



ANÁLISE DAS ALTERNATIVAS PARA A DESCARBONIZAÇÃO DA
INDÚSTRIA BRASILEIRA A PARTIR DE UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO

Otto Hebeda

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Planejamento Energético.

Orientadores: Amaro Olímpio Pereira Junior
Emílio Lebre La Rovere

Rio de Janeiro
Março de 2024

Hebeda, Otto

Análise das Alternativas para a Descarbonização da Indústria Brasileira a partir de um Modelo de Otimização / Otto Hebeda. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2024.

XVII, 246 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador (es): Amaro Olímpio Pereira Junior

Emílio Lebre La Rovere

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Planejamento Energético, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 163-188.

1. Mudanças climáticas. 2. Descarbonização. 3. Indústria. I. Pereira, Amaro *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

*“Então considere que as botas apertadas são uma das maiores venturas da terra, porque,
fazendo doer os pés, dão azo ao prazer de as descalçar.”*

– Brás Cubas, Memórias Póstumas de Brás Cubas

AGREDECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Alice e Werner, que me apoiaram em todo o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Agradeço a minha esposa, Maria Carolina, que esteve ao meu lado nestes anos tão conturbados, sempre me apoiando e garantindo que eu continuasse no meu caminho.

Aos meus amigos, que não nomearei para não causar nenhum prejuízo fruto do esquecimento. Mas aqueles que porventura venham a ler esta tese, sintam-se agradecidos. Suas companhias são uma válvula de escape mental.

Aos meus orientadores, Amaro e Emilio, que confiaram na minha capacidade e no meu trabalho. E por todos estes anos em que estiveram dispostos a me ensinar e auxiliar na pesquisa e neste caótico mundo acadêmico.

À banca que aceitou o convite e a tarefa de avaliar este trabalho.

Aos funcionários do PPE, que são a base estrutural para o funcionamento desta instituição. Em especial a Sandrinha que sempre esteve a postos para me ajudar.

Aos professores do PPE por terem me passado um pouco de seu conhecimento, indispensável para elaboração desta tese.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ANÁLISE DAS ALTERNATIVAS PARA A DESCARBONIZAÇÃO DA INDÚSTRIA BRASILEIRA A PARTIR DE UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO

Otto Hebeda

Março/2024

Orientadores: Amaro Olímpio Pereira Junior

Emílio Lebre La Rovere

Programa: Planejamento Energético

Com o intuito de limitar o aquecimento global em até 2°C e se possível em até 1,5°C, objetivo definido pelo Acordo de Paris, é preciso atingir o nível zero de emissões líquidas de gases de efeito estufa (GEE) no início da segunda metade do século XXI. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo investigar os possíveis caminhos da descarbonização da indústria brasileira. Para atingi-lo, foi desenvolvido um modelo que apresenta uma descrição detalhada do perfil energético e de emissões de GEE do setor industrial, considerando a introdução de tecnologias inovadoras, o aumento da eficiência energética e a penetração de fontes energéticas renováveis. Foram desenvolvidos três cenários, um tendencial (BAU) e dois de mitigação alinhados com objetivos *net-zero* (Cenário A e Cenário B) a fim de analisar o papel de cada uma dessas ações no caminho da descarbonização do setor, e os custos para atingir estes objetivos. No cenário A, a indústria brasileira poderá atingir seus compromissos de emissões apenas utilizando tecnologias já consolidadas pelo setor, aumentando o uso daquelas baseadas em fontes não-fósseis, como biomassa e eletricidade. Já no Cenário B, haveria a necessidade de introduzir tecnologias inovadoras, como Redução Direta e Captura de Carbono. Por fim, são apresentadas as barreiras à realização das ações de descarbonização, instrumentos para removê-las e as oportunidades para o setor industrial.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

ANALYSIS OF ALTERNATIVES FOR DECARBONIZING THE BRAZILIAN
INDUSTRY USING AN OPTIMIZATION MODEL

Otto Hebeda

March/2024

Advisors: Amaro Olímpio Pereira Junior
Emílio Lebre La Rovere

Department: Energy Planning

To limit global warming to 2°C and preferably to 1.5°C, a goal set by the Paris Agreement, it is necessary to achieve net-zero greenhouse gas emissions in the early second half of the 21st century. In this context, this work aims to investigate the possible paths of decarbonization of the Brazilian industry. To achieve this, a model was developed that provides a detailed description of the energy profile and GHG emissions of the industrial sector, considering the introduction of innovative technologies, increased energy efficiency, and the penetration of renewable energy sources. Three scenarios were developed: a baseline scenario (BAU) and two mitigation scenarios aligned with net-zero goals (Scenario A and Scenario B) to analyze the role of each of these actions in the decarbonization path of the sector and the costs to achieve these objectives. In Scenario A, the Brazilian industry could meet its emission commitments by using only technologies already consolidated by the sector, increasing the use of those based on non-fossil sources, such as biomass and electricity. In Scenario B, there would be a need to introduce innovative technologies, such as Direct Reduction and Carbon Capture. Finally, barriers to the implementation of decarbonization actions, instruments to remove these barriers, and opportunities for the industrial sector are identified and discussed.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1. Objetivo.....	8
1.2. Estrutura da tese.....	9
2. A indústria brasileira: seu perfil e suas emissões	11
2.1. Perfil econômico	11
2.2. Perfil energético	13
2.3. Perfil de emissões	16
3. Medidas de mitigação para a indústria	19
3.1. Ferro-gusa e aço	19
3.2. Setor de cimento	24
3.3. Setor químico	26
3.4. Medidas transversais aos segmentos industriais.....	28
4. Modelagem energética e de emissões.....	34
5. Metodologia.....	43
5.1. Modelagem Bottom-up do consumo energético e de emissões da indústria	43
5.1.1. Ferro-gusa e aço.....	45
5.1.2. Química.....	55
5.1.3. Cimento.....	63
5.1.4. Metodologia para os demais segmentos	70
5.2. Custo Marginal de Abatimento.....	85
5.3. Cenários	87
5.4. Ferramentas de cálculo	90
6. Resultados.....	92
6.1. Cenário Referência.....	92
6.2. Cenário A	96

6.2.1.	Nível de emissão e perfil energético.....	96
6.2.2.	Resultados tecnológicos por setor.....	100
6.2.3.	Custo de mitigação.....	111
6.3.	Cenário B.....	114
6.3.1.	Nível de emissão e perfil energético.....	114
6.3.2.	Resultados tecnológicos por setor.....	118
6.3.3.	Custos de mitigação.....	128
6.4.	Indicadores dos cenários.....	131
6.5.	Barreiras, instrumentos e oportunidades da descarbonização industrial.....	135
6.5.1.	Barreiras.....	136
6.5.2.	Instrumentos.....	146
6.5.3.	Oportunidades.....	153
7.	Conclusões.....	157
7.1.	Contribuições para o setor industrial brasileiro.....	157
7.2.	Limitações e recomendações.....	160
	Referências.....	163
	Apêndice A.....	189
A1.	Ferro-gusa e Aço.....	189
A2.	Cimento.....	195
A3.	Ferroligas.....	203
A4.	Química.....	207
A5.	Mineração e pelletização.....	214
A6.	Papel e celulose.....	221
A7.	Textil.....	226
A8.	Alimentos e bebidas.....	230
A9.	Metais não ferrosos.....	235
A10.	Cerâmica.....	240

A11. Outras indústrias	244
------------------------------	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quadro resumo sobre as diferenças entre Taxação de Carbono e Mercado de Carbono	6
Tabela 2 - Potencial de eficiência energética na indústria química	26
Tabela 3 - Modelos de análise integrada utilizados para cenários climáticos	36
Tabela 4 - Lista de artigos relevantes sobre modelagem bottom-up de consumo energético e emissões	41
Tabela 5 - Consumo específico das rotas tecnológicas tradicionais na produção de Aço.....	46
Tabela 6 - Medidas de eficiência energética para o setor de Ferro-gusa e Aço.....	47
Tabela 7 - Consumo específico de tecnologias inovadoras na produção de aço	50
Tabela 8 - Preço de fontes de energia	54
Tabela 9 - Consumo Específico de produtos da indústria química.....	55
Tabela 10 - Fator de emissão dos produtos da indústria química	57
Tabela 11 - Medidas de eficiência energética consideradas para a indústria química.....	58
Tabela 12 - Coeficiente de destinação por combustível da indústria cimenteira.....	64
Tabela 13 - Medidas de mitigação aplicáveis ao setor de cimento	66
Tabela 14 - Coeficientes de Destinação para o Setor de Alimentos e Bebidas	73
Tabela 15 Coeficiente de eficiência por combustível da indústria de alimentos e bebidas	74
Tabela 16 - Medidas de eficiência energética aplicadas para os demais segmentos industriais	76
Tabela 17 - Fator de emissão por tecnologia de produção de alumínio.....	84
Tabela 18 - taxa média anual de crescimento da indústria e de seus segmentos industriais ...	89
Tabela 19 - Consumo energético por combustível da indústria de Ferro-gusa e Aço	92

Tabela 20 - Percentual de fontes renováveis e fósseis no cenário de referência	94
Tabela 21 - Emissões de GEE por setor entre 2020 e 2050 no Cenário de Referência	95
Tabela 22 - Consumo energético por segmento entre 2020 e 2050 no Cenário A	96
Tabela 23 - Consumo energético por fonte de energia entre 2020 e 2050 no Cenário A.....	98
Tabela 24 - Participação de fontes renováveis e fósseis no cenário A entre 2020 e 2050.....	99
Tabela 25 - Emissões por segmento entre 2020 e 2050 no Cenário A e de Referência	99
Tabela 26 - Matriz energética industrial em porcentagem entre 2020 e 2050.....	102
Tabela 27 - Indicadores da indústria de cimento entre 2020 e 2050 no Cenário A.....	104
Tabela 28 - Percentual de renovabilidade dos demais segmentos industriais	108
Tabela 29 - Custo Marginal de Abatimento, em \$/tCO ₂ e entre 2020 e 2050 por década no Cenário A.....	112
Tabela 30 - Consumo energético dos segmentos industriais entre 2020 e 2050 no Cenário B	115
Tabela 31 - Consumo energético por fonte entre 2020 e 2050 no cenário B.....	116
Tabela 32 - Percentual de fontes renováveis entre 2020 e 2050 no Cenário B	117
Tabela 33 - Emissões por segmento entre 2020 e 2050 no Cenário B	117
Tabela 34 - Matriz energética do setor de ferro-gusa e aço entre 2020 e 2050 no Cenário B	120
Tabela 35 - Indicadores da indústria de cimento entre 2020 e 2050 no Cenário B.....	121
Tabela 36 - Cenário B: percentuais das fontes renováveis nos demais segmentos industriais	126
Tabela 37 - Cenário B: custos marginais de abatimento entre 2020 e 2050 por década	130
Tabela 38 - Emissões absolutas por cenário entre 2020 e 2050	132

Tabela 39 - Intensidade das emissões da indústria (tCO ₂ e/ milhões de reais).....	133
Tabela 40 - Consumo energético por cenário entre 2020 e 2050	134
Tabela 41 - Percentual de fontes renováveis nos diferentes cenários entre 2020 e 2050	135
Tabela 42 – Custo marginal de abatimento por cenário de mitigação entre 2030 e 2050.	135
Tabela 43 - Quadro Resumo das barreiras as medidas de mitigação para o setor industrial. 145	
Tabela 44 - Instrumentos para superar as barreiras a descarbonização da indústria brasileira	152
Tabela 45 - Produção de aço por país em 2020	189
Tabela 46 - Consumo específico dos principais grupos químicos.....	212
Tabela 47 - Produtos da indústria têxtil, suas matérias primas e segmento.....	227
Tabela 48 - Ranking do Brasil e sua participação no mercado mundial dos principais produtos da indústria de Alimentos e Bebidas.....	231
Tabela 49 - Produção brasileira dos principais produtos da indústria de alimentos e bebidas	231
Tabela 50 - Principais processos dos produtos da indústria de alimentos e bebidas	232
Tabela 51 - Tipos de cerâmica e sua quantidade produzida em 2021	240

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Percentual do PIB da indústria de transformação no PIB nacional	12
Figura 2 - Participação de segmentos industriais no PIB da indústria de transformação	13
Figura 3 - Consumo energético industrial entre 2005 e 2022.....	14
Figura 4 - Perfil energético da indústria de transformação brasileira em 2022.....	15
Figura 5 - Participação dos segmentos industriais no consumo energético do setor em 2022	15
Figura 6 - Emissões de GEE do Brasil entre 2005 e 2022.....	16
Figura 7 Emissões industriais brasileiras entre 2005 e 2022.....	17
Figura 8 - Participação dos segmentos industriais nas emissões do setor em 2022	18
Figura 9 - Demanda de calor por faixa de temperatura no setor industrial global.....	30
Figura 10 - Diagrama do módulo do setor de Ferro-gusa e Aço	51
Figura 11 - Diagrama da modelagem energética e de emissões da indústria química	63
Figura 12 - Esquema da modelagem do setor de cimento.....	70
Figura 13 - Diagrama do módulo de emissões dos demais segmentos industriais	71
Figura 14 - Esquema do balanço de energia útil.....	72
Figura 15 - Emissões diretas da Indústria global no cenário SDS.....	88
Figura 16 - Nível de atividade dos segmentos industriais entre 2020 e 2050.....	90
Figura 17 - Participação das tecnologias na produção de Aço no Cenário A.....	101
Figura 18 - Consumo energético entre 2020 e 2050 na indústria de cimento no Cenário A.	105
Figura 19 - Consumo energético entre 2020 e 2050 na indústria química no Cenário A.....	106
Figura 20 - Percentual de penetração das tecnologias de mitigação na indústria química entre 2020 e 2050 no Cenário A	107

Figura 21 - Ganho de eficiência energética acumulado entre 2020 e 2050 no Cenário A para os demais segmentos industriais.....	109
Figura 22 - Variação do consumo específico para os demais segmentos industriais entre 2020 e 2050 no Cenário A	110
Figura 23 - Curva de Custo Marginal de Abatimento para o Cenário A em 2050	113
Figura 24 - Emissões da indústria brasileira entre 2020 e 2050 no Cenário B.....	114
Figura 25 - Participação das tecnologias na produção de Aço entre 2020 e 2050 no Cenário B	119
Figura 26 - Cenário B: Consumo energético da indústria de cimento	122
Figura 27 - Consumo energético da indústria química entre 2020 e 2050 no Cenário B.....	123
Figura 28 - Penetração das tecnologias na indústria química entre 2020 e 2050 no Cenário B	124
Figura 29 - Ganhos acumulados de eficiência energética entre 2020 e 2050 no Cenário B..	127
Figura 30 - Cenário B: Consumo específico dos demais segmentos industriais	128
Figura 31 - Curva de Custo Marginal de Abatimento do Cenário B no período 2041-2050.	131
Figura 32 -Produção de aço no Brasil entre 2005 e 2023	190
Figura 33 - Fluxograma da produção de aço a partir de tecnologias tradicionais	192
Figura 34 - Consumo energético da indústria de ferro-gusa e aço no Brasil entre 2005 e 2022	194
Figura 35 - Matriz energética da produção de ferro-gusa e aço no Brasil.....	195
Figura 36 - Esquema de uma típica planta de cimento	197
Figura 37 - Produção de cimento entre 2005 e 2022	198
Figura 38 - Consumo específico da produção de cimento em GJ/t no mundo, Europa e Brasil entre 1990 e 2020.....	199

Figura 39 Matriz energética do setor de cimento brasileiro	200
Figura 40 - Intensidade de emissões da indústria de cimento no mundo, Europa e Brasil entre 1990 e 2020.....	201
Figura 41 - Razão Clinquer cimento Mundo, Europa e Brasil entre 1990 e 2020.....	202
Figura 42 - Emissões de cimento (MtCO ₂ e).....	203
Figura 43 – nível de produção da indústria de ferroligas.....	205
Figura 44 – Consumo energético da indústria de ferroligas	205
Figura 45 - Matriz energética da indústria de ferroligas.....	206
Figura 46 - Emissões da indústria de Ferroligas entre 2005 e 2021	207
Figura 47 - Valor da produção da indústria química	208
Figura 48 - Fluxograma da produção da petroquímica.....	209
Figura 49 - Fluxograma da produção de fertilizantes	210
Figura 50 - Esquema da produção da indústria cloro-álcali	211
Figura 51 - Matriz energética do setor da indústria Química entre 1970 e 2022.....	213
Figura 52 - Consumo energético na indústria química entre 2005 e 2022	213
Figura 53 - Emissões de energia e processo da indústria química entre 2005 e 2022.....	214
Figura 54 - Percentual da produção de minérios no Brasil.....	215
Figura 55 – Produção de ferro entre 2005 e 2021.....	216
Figura 56 - Fluxograma simplificado de mineração	218
Figura 57 - Consumo energético da indústria de mineração e pelotização.....	219
Figura 58 - Matriz energética da indústria de mineração e pelotização	220
Figura 59 - Emissões do setor de mineração e pelotização brasileiro entre 2005 e 2022.....	221

Figura 60 - Produção de papel e celulose entre 2005 e 2019 no Brasil.....	221
Figura 61 - Fluxograma da produção de celulose.....	223
Figura 62 - Matriz energética do setor de papel e celulose entre 1970 e 2022.....	225
Figura 63 - Consumo energético entre 2005 e 2022 do setor de papel e celulose.....	225
Figura 64 - Emissões do setor de papel e celulose entre 2005 e 2021.....	226
Figura 65 - Fluxograma do processo de produção da Indústria têxtil.....	228
Figura 66 - Matriz energética da indústria têxtil.....	229
Figura 67 - Consumo energético da indústria têxtil entre 2005 e 2022.....	229
Figura 68 - Emissões totais da indústria têxtil.....	230
Figura 69 - Matriz energética da indústria de alimentos e bebidas.....	233
Figura 70 - Consumo energético da indústria de alimentos e bebidas.....	234
Figura 71 - Emissões de GEE do setor de Alimentos e Bebidas.....	235
Figura 72 - Produção de alumínio no Brasil entre 2005 e 2020.....	236
Figura 73 - Matriz energética do setor de metais não ferrosos entre 1970 e 2022.....	238
Figura 74 - Consumo energético do setor de metais não-ferrosos.....	238
Figura 75 - Consumo específico da produção de alumínio em kWh/t de alumínio em diversas regiões do mundo e no Brasil.....	239
Figura 76 - Emissões de GEE da indústria de metais não-ferrosos entre 2005 e 2022.....	240
Figura 77 - Matriz energética do setor de cerâmica entre 1970 e 2022.....	242
Figura 78 - Consumo energético do setor de cerâmica entre 2005 e 2022.....	243
Figura 79 - Emissões de GEE do setor de cerâmica entre 2005 e 2021.....	244
Figura 80 - Matriz energética do setor de "Outras indústrias".....	245

Figura 81 - Consumo energético do setor de "Outras indústrias" entre 2005 e 2022245

1. Introdução

A temperatura média global aumentou em 1,1°C em comparação aos níveis pré-industriais devido às atividades humanas. Os danos causados por essa elevação já podem ser sentidos nos ecossistemas e na sociedade. Nos últimos anos, observa-se um aumento de eventos climáticos extremos como aumento de chuvas intensas, alagamentos, incêndios florestais e ondas de calor. Em consequência, houve uma redução da segurança alimentar e hídrica que afeta principalmente países na África, Ásia, América Central e do Sul. Cerca de metade da população mundial já sofre com a escassez de água fruto das mudanças climáticas calor. Também são observados danos causados à saúde física e mental da população. O aumento de calor extremo está associado ao crescimento da mortalidade, expansão de doenças para novas áreas e aumento de casos de doenças como cólera. O aumento das queimadas causou um crescimento em doenças cardiovasculares e respiratórias. Além disso, serviços de saúde têm sido impactados pelos eventos extremos como inundações (IPCC, 2023).

A janela para evitar que os impactos escalem está se fechando. Recordes de temperatura vem sendo quebrados ano após ano. De acordo com a *World Meteorological Organization* (WMO, 2024) o ano de 2023 foi o mais quente já registrado, sendo 1,45°C maior do que os níveis pré-revolução industrial. Se mantidas as políticas atuais, a projeta-se que a temperatura média global poderá aumentar em 3°C até o fim do século¹ (UNEP, 2023).

Reconhecendo a necessidade de combater com urgência as mudanças climáticas, em 2015, 196 países assinaram um tratado no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança Global do Clima (UNFCCC, sigla em inglês), o Acordo de Paris. Ele estabeleceu o objetivo de limitar o aquecimento global a bem menos de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, buscando esforços para limitar até 1,5 °C (UNFCCC, 2015). Segundo o IPCC, um aumento de temperatura superior a 2°C aumenta consideravelmente os impactos causados pelas mudanças climáticas. Acima desta temperatura, ondas de calor ocorreriam quatro vezes mais do que acontecem atualmente; precipitações seriam 1,5 vezes mais comuns; e secas teriam frequência duas vezes superior. Limitar a temperatura em 1,5°C

¹ A projeção de 3°C se refere a uma probabilidade de 66% com uma variação entre 1,9 e 3,8°C.

poderia diminuir a probabilidade desses eventos acontecerem significativamente. Estima-se, por exemplo, que o risco de desaparecimento de espécies seja de 30 a 50% inferior caso o aumento da temperatura se limite à 1,5°C. Nesse mesmo sentido, impactos nos biomas terrestres cairiam de 13% da área total para 4% (IPCC, 2023). Na atual projeção, espera-se que o planeta supere o nível de 1,5°C em 2027 (WMO, 2024).

Os atuais compromissos de limitação de emissões de gases de efeito estufa (GEE) assumidos pelos países membros do Acordo de Paris através de suas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs, em inglês) levaram ao desenvolvimento de políticas públicas nacionais focadas na mitigação de emissões de GEE. Entretanto ainda existe uma diferença entre as emissões projetadas no caso do cumprimento das NDCs e o que os caminhos de mitigação modelados para limitar o aquecimento global em 1,5°C (IPCC, 2023). Para limitar o aquecimento global nos níveis estabelecidos pelo Acordo de Paris, é necessária uma redução entre 2022 e 2030 de 57,4 para 33 GtCO_{2e} (42,5%), numa trajetória consistente com 1,5°C ou para 41 GtCO_{2e} (29%) numa trajetória consistente com 2°C, e atingir níveis de emissões líquidas zero até 2050 ou até 2070, respectivamente (UNEP, 2023). Para alcançar essa meta, é crucial entender as trajetórias dos países para descarbonizar suas economias (BATAILLE et al., 2018; HARPPRECHT et al., 2022). E, neste sentido, o setor industrial, como um dos principais responsáveis pelas emissões globais, possui papel central neste processo.

A indústria é responsável por 25% das emissões globais de GEE proveniente da queima de combustíveis fósseis e de processos² (IPCC, 2023). Olhando de forma segmentada, a indústria siderúrgica emite cerca de 8,3% dos gases de efeito estufa, cimento 6,4% e a química, 4,0% (IEA, 2023a). Suas emissões têm crescido de forma mais acentuada que qualquer outro setor na economia, puxadas pelo aumento da população global e do PIB *per capita*, resultando em um aumento da demanda por produtos (BASHMAKOV, I.A. et al., 2022).

O desafio de diminuir as emissões do setor industrial se agrava considerando as atuais perspectivas de crescimento da demanda (BATAILLE; NILSSON; JOTZO, 2021;

²Se emissões indiretas, como relacionadas com o consumo de energia elétrica, forem consideradas o setor industrial é responsável por 34% das emissões globais totais (IPCC, 2023)

MCKINSEY & COMPANY, 2018). Os investimentos existentes e planejados para a indústria pesada, em conjunto com os da geração de eletricidade, poderão levar o mundo a ultrapassar o limite de aumento de temperatura de 1,5°C(TONG et al., 2019).

Alinhar as emissões do setor industrial no caminho para garantir o compromisso das metas climáticas exigirá uma profunda mudança no perfil estrutural do setor (GRIFFIN, 2015). A indústria é um setor diversificado em função da gama de produtos, que podem ser fabricados por diferentes rotas tecnológicas. Suas emissões ocorrem tanto pela queima de combustíveis fósseis, como pelas reações químicas de seus processos e pelo uso de produtos (IPCC, 2006).

A dificuldade de reduzir as emissões no setor industrial está ligada não só à diversidade do setor, mas também nas opções de mitigação que lhe são disponíveis. Em setores como transporte e energia, as tecnologias já estão disponíveis e seus desafios se concentram, de forma geral, em aspectos econômicos ou ao longo da cadeia (IEA, 2020d). Já a descarbonização do setor industrial se apoia em tecnologias com baixo nível de maturidade.

Um dos fatores que dificulta a mitigação de GEE do setor industrial é a necessidade de altas temperatura de seus processos (IEA, 2020d). As indústrias siderúrgica, cimenteira e química possuem processos que precisam alcançar temperaturas próximas a 1.500°C (BASHMAKOV, I.A. et al., 2022; IEA, 2020d). Gerar calor para atingir esse nível de temperatura a partir de fontes renováveis ou eletricidade costuma ser menos prático e mais caro quando comparado com fontes fósseis.

Outro aspecto está ligado as emissões de processo (IEA, 2020d). Como estas emissões são inerentes ao produto que se está fabricando, menores são suas opções de mitigação (IEA, 2020d). Um exemplo disto são as emissões de cimento que ocorrem pelo processo de calcinação. Independente do combustível utilizado no processo, elas continuam a ocorrer. Desta forma, a única opção para reduzir estas emissões é através da captura de carbono. Em casos como a indústria química ou siderúrgica, evitar emissões de processo pode significar a alteração completa da estrutura da planta industrial (IEA, 2020d).

As tecnologias utilizadas pelo setor industrial possuem vida útil longa, chegando até 40 anos (IEA, 2020d). O descomissionamento antecipado de alguma tecnologia implica gastos elevados para o setor. Desta forma, a possibilidade de substituir um determinado processo pode ser limitada pelo ano em que ele foi instalado. Agravam esta situação alguns aspectos comerciais. O setor industrial é extremamente competitivo, e aumentos do custo de produção possuem alto impacto nas margens de lucro das companhias (IEA, 2020d).

Com a necessidade de reduzir as emissões, governos vêm desenvolvendo políticas para direcionar os investimentos em tecnologias de menor emissão. A utilização de precificação de carbono é uma das principais formas de promover ações de mitigação de gases de efeito estufa (STIGLITZ et al., 2017). Ao colocar um preço sobre as emissões, ela ajuda a direcionar a responsabilidade das mudanças climáticas para aqueles que são responsáveis por gerá-la. Diferentemente de outras medidas, como limitar as emissões de GEE, a precificação de carbono não dita como deverá ser feita a mitigação. Ela permite que os responsáveis tomem a decisão de fazer investimentos na redução ou pagar pelas emissões de GEE.

Este instrumento vem se tornando um consenso entre governos do mundo inteiro. Atualmente, de acordo com o Banco Mundial (2023), existem 73 iniciativas ligadas a precificação de carbono implementadas no mundo, cobrindo cerca de 23% das emissões globais, a um valor médio de 35 \$/tCO₂e.

Em linhas gerais, ela pode ser feita através de um sistema de taxaço, onde um preço é pago por unidade de GEE ou por um mercado de emissões (*cap-and-trade*), onde compras e vendas de direitos de permissão de emissões de GEE são comercializados. Há também sistemas híbridos, no qual os dois sistemas coexistem, operando em setores diferentes, incluindo elementos de controle de cada um deles (CNI, 2020).

O conceito de taxaço de carbono remete às taxaço de poluiço, i.e., externalidades negativas causadas por um agente poluidor. É chamada de Taxa Pigouviana, a partir de Arthur C. Pigou (1877-1959), que propôs uma taxa como uma forma de equiparar custos sociais e privados (PEARCE; TURNER, 1990). Nela, o Estado define um preço a ser cobrado por cada unidade de GEE emitida ou, de forma indireta, combustível fóssil consumido,

deixando para o mercado reagir e ajustar a quantidade de GEE emitido em um novo equilíbrio (TORO GONZÁLEZ, 2020).

Em um sistema de comércio de emissões, o órgão regulador define uma meta de emissões, gerando uma quantidade de permissões (licenças) que serão alocadas entre os setores ou empresas que irão comercializar estas cotas de emissão (TORO GONZÁLEZ, 2020). Desta forma, as empresas poderão optar por reduzir as suas emissões e venderem os seus créditos remanescentes às empresas que não conseguirem abater suas emissões com suas cotas. Assim, o preço relativo às emissões é definido pela oferta e demanda das cotas.

A taxação tem a vantagem de trazer mais previsibilidade para os setores uma vez que o seu preço é conhecido e pré-definido, mesmo podendo subir no futuro, enquanto as licenças apresentam maior volatilidade dado que as cotas de emissão são valores fixos e sua demanda irá variar com o tempo (EPE, 2020). Além disso, a precificação também gera um aumento da arrecadação do Estado, que pode reverter este dinheiro para programas sociais, financiar tecnologias de baixo carbono ou mesmo a redução de impostos (GROTTERA, 2018; GROTTERA et al., 2022).

Entretanto, a implementação de taxa de carbono pode acarretar uma resistência política devido a criação de novos tributos. Em particular, parte do setor industrial brasileiro já havia demonstrado preocupação com os impactos de uma taxação de carbono sobre a sua cadeia produtiva (CNI, 2021).

O sistema de comércio de emissões permite que as empresas tracem seus caminhos escolhendo quando e onde reduzir suas emissões de GEE. Devido a flexibilidade deste modelo, as empresas poderão optar por reduzir suas emissões implementando, em um primeiro momento, medidas de mitigação mais baratas quando isto for rentável para a companhia (TORO GONZÁLEZ, 2020). Por causa destas qualidades, o setor industrial brasileiro demonstrou preferência por este sistema de precificação (CNI, 2020, 2021).

Tabela 1 - Quadro resumo sobre as diferenças entre Taxação de Carbono e Mercado de Carbono

Taxação de Carbono	Mercado de Carbono
Baseado no preço cobrado por quantidade de GEE emitido	Baseado na quantidade de emissões limite permitidas e pré-estabelecida. Neste, os preços são voláteis
Mais adequado a setores pulverizados (transporte)	Mais adequado em atividades concentradas (indústria)
Fácil implementação. Feita através de estrutura institucional já estabelecida	Necessária a criação de estrutura administrativa para as operações
Enfrenta barreiras políticas	Dificuldades de identificar alocação de emissões
Não apresenta certeza sobre as emissões	Como as cotas emitidas são conhecidas, é mais preciso saber a quantidade de GEE emitido

Fonte: elaboração própria com base em (CNI, 2020; EPE, 2020)

O Brasil tem se aproximado da implementação de um mercado de carbono nos últimos anos. No final de 2023, a Câmara dos Deputados aprovou o projeto de Lei 2.148 de 2015 que institui o SBCE - Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa. O texto ainda tem de ser aprovado pelo Senado, entretanto, o projeto de lei que foi aprovado pela câmara já incorpora outro projeto que havia sido aprovado pelo Senado, o PL 414/2021 (BRASIL, 2023a).

No PL 2.148/2015, o SBCE terá como finalidade “*dar cumprimento à PNMC e aos compromissos assumidos sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*” (BRASIL, 2023a). O sistema terá uma estrutura de governança responsável por definir os períodos de compromisso e os limites de emissões, com base em metas definidas pelo PNMC.

Sua composição será formada por um Órgão Superior e Deliberativo, um Órgão Gestor e um Comitê Técnico Consultivo Permanente, no qual o Poder Executivo irá estabelecer as regras de funcionamento. Dentre as competências do Órgão Superior e Deliberativo, estão o estabelecimento de diretrizes gerais e aprovar o Plano Nacional de Alocação. Já o Órgão Gestor possui um conjunto de 27 atribuições, destacando-se que ele irá

definir (i) as “*metodologias de monitoramento e a apresentação de informações sobre emissões, redução de emissões e remoção de gases de efeito estufa*”, (ii) “*a definição das atividades, instalações, fontes e gases a serem regulados sob o SBCE a cada período de compromisso*”. Por fim, o Órgão Técnico Consultivo irá fornecer subsídios e recomendações para aprimoramento do SBCE.

Os ativos a serem instituídos e negociados pelo SBCE são as Cotas Brasileiras de Emissão (CBE) e os Certificados de Redução ou Remoção Verificada de Emissões (CRVE). A CBE poderá ser distribuída tanto de forma gratuita, ou a título oneroso através de leilão ou outro instrumento. Sendo que cada CBE (1 tCO₂e) será considerada um ativo comercializável utilizada para atingir as metas de emissão, assim como o CRVE (1 tCO₂e), crédito gerado pela redução das emissões ou remoção.

Ficará a cargo do Plano Nacional de Alocação estabelecer “*I – o limite máximo de emissões; II – a quantidade de Cotas Brasileiras de Emissões a ser alocada entre os operadores; III – as formas de alocação das Cotas Brasileiras de Emissões, gratuita ou onerosa, para as instalações e fontes reguladas; IV – o percentual máximo de Certificados de Redução ou Remoção Verificada de Emissões admitidos na conciliação periódica de obrigações; V – a gestão e operacionalização dos mecanismos de estabilização de preços dos ativos integrantes do SBCE, garantindo o incentivo econômico à redução de emissões ou remoção de GEE; VI – critérios para transações de Remoções Líquidas de Emissões de Gases de Efeito Estufa; e VII – outros dispositivos relevantes para implementação do SBCE, conforme definido em ato específico do órgão gestor do SBCE e nas diretrizes gerais estabelecidas pelo Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima*”.

Para definir a quantidade alocada de emissões, o Plano Nacional de Alocação estabelecerá as cotas em função dos seguintes critérios (art. 21): (i) desenvolvimento tecnológico, (ii) custos marginais de abatimento, (iii) reduções de emissões de GEE e ganhos históricos de eficiência, (iv) outros parâmetros, (v) contribuição para descarbonização de outros setores.

As empresas que são reguladas pelo SBCE são aquelas que exercem atividade com emissões de GEE anuais superiores a 10 ktCO₂e, sendo obrigadas a enviar anualmente um relato de emissões e remoções de GEE, um plano de monitoramento de emissões, além de

atender as exigências do órgão gestor. Além disso, as empresas com emissões de GEE anuais superiores a 25 ktCO₂e, deverão enviar um relato de conciliação periódica de obrigações.

Assim, espera-se que, após uma fase de implantação gradual nos próximos anos, a partir de 2030 o Brasil disponha de um poderoso instrumento de política pública para promover a descarbonização da indústria brasileira.

1.1. Objetivo

Considerando os desafios da mitigação das emissões de GEE da indústria, pode-se destacar alguns motivos que justificam o estudo aprofundado sobre os caminhos de descarbonização da indústria brasileira:

- i. O Brasil é um dos principais países que contribuem com as emissões de gases de efeito estufa (GEE) no mundo;
- ii. o setor industrial é responsável por boa parte das emissões do país;
- iii. a dificuldade de mitigar as emissões no setor industrial e os compromissos estabelecidos pelo Brasil em reduzir suas emissões exigem um olhar holístico sobre os diversos processos industriais e suas opções tecnológicas de baixo carbono;
- iv. a escolha de uma tecnologia de mitigação é influenciada por elementos como oferta de recursos e seus preços, da forma que cada país apresentará um caminho único.

Levando em considerações estas justificativas, esta tese tem como objetivo geral analisar possíveis caminhos para mitigação das emissões de GEE na indústria brasileira em função de diversos cenários de longo prazo, consoantes com as metas de redução das emissões estabelecidas pelo país.

Para alcançar estes objetivos, será desenvolvido arcabouço quantitativo para fazer a análise destes cenários. A metodologia a ser utilizada parte da descrição detalhada do perfil energético e de emissões de onze segmentos industriais e um sistema de otimização que minimiza os custos de mitigação de GEE. Desta forma, o modelo será capaz de estimar a penetração de tecnologias mitigadoras das emissões de GEE, o consumo energético e os seus

custos de mitigação, em função de restrições ligadas a penetração das tecnologias, oferta de recursos energéticos e matérias-primas.

Serão desenvolvidos três cenários para esta tese. Um primeiro que apresentará as emissões tendenciais do setor industrial até 2050, para demonstrar como deve ser o comportamento do setor na ausência de mudança na estrutura de produção. Outros dois cenários são alinhados com os objetivos climáticos de emissões líquidas-zero para o Brasil em 2050, e se diferenciam entre si pelo esforço que a indústria deverá ter para reduzir as suas emissões.

Além do objetivo geral supracitado, também são objetivos específicos desta tese:

- i. desenvolver um modelo que permita compreender os possíveis caminhos para descarbonizar a indústria brasileira, detalhando seus segmentos mais importantes para as emissões de GEE;
- ii. análise do potencial de mitigação bem como seus custos para direcionar as políticas climáticas aplicadas ao setor industrial;
- iii. estudar como as principais rotas tecnológicas podem contribuir e influenciar a descarbonização brasileira.
- iv. Apresentar as barreiras, instrumentos e oportunidades para a transição do setor industrial em uma economia de baixo carbono

1.2. Estrutura da tese

Esta tese é organizada em 10 capítulos. Este primeiro tem o intuito de apresentar o problema e as perguntas que este trabalho busca responder, através da apresentação das principais questões ligadas às mudanças climáticas e os desafios para o setor industrial, em especial, a indústria brasileira.

Os capítulos 2 a 5 seguintes se referem à revisão bibliográfica desta tese. No segundo capítulo, é feita uma descrição da indústria brasileira, sob a ótica das emissões de gases de efeito estufa. Esse capítulo serve como base para compreender como é o perfil energético do setor e onde ocorrem suas principais emissões. Com isso, pode-se começar a enxergar quais serão as dificuldades e as vantagens que a indústria nacional possui no processo de transição para uma economia de baixo carbono. O terceiro capítulo aborda as medidas de mitigação

que podem ser utilizadas pelo setor industrial para atingir os seus compromissos climáticos. É uma revisão da literatura dos principais trabalhos e tecnologias de baixo carbono. O quarto capítulo apresenta quais são os métodos utilizados para analisar caminhos de descarbonização. Nele, é apresentado um levantamento dos estudos que buscaram responder sobre o potencial de mitigação das emissões de GEE em relação ao setor industrial.

No capítulo 6 é apresentada a metodologia utilizada nesta tese. Esse capítulo começa abordando os métodos desenvolvidos para estimar o consumo energético, as emissões, a penetração das tecnologias de baixo carbono e os seus custos para a indústria brasileira. Por fim, é descrito como foi feito o desenho dos cenários a serem analisados por este estudo.

Os últimos capítulos trazem os resultados (capítulo 7) para cada um dos cenários desenvolvidos, destrinchados entre os principais segmentos industriais. Nele, serão discutidas sobre as barreiras, os instrumentos de política para superá-las e as oportunidades que a transição da indústria brasileira para uma economia de baixo carbono pode trazer. O capítulo 8 traz as conclusões deste trabalho indicando as principais contribuições que este estudo traz. Por fim, no último capítulo é apresentado um conjunto de recomendações para pesquisas futuras que podem ser feitas a partir desta tese.

2. A indústria brasileira: seu perfil e suas emissões

Nesta seção será feita uma caracterização da indústria brasileira para que seja possível compreender o perfil de suas emissões. O foco será dado no setor industrial como um todo, em sua estrutura e nas principais mudanças dos últimos anos. Como o setor industrial é diverso, composto por inúmeros processos e produtos, os detalhes relativos a cada um dos principais segmentos industriais são apresentados no Apêndice A desta tese³.

2.1. Perfil econômico

A indústria brasileira se desenvolveu ao longo do século XX. No período entre 1940 e 1980, sendo caracterizada pela forte presença do estado em áreas como siderurgia, petroquímica e combustíveis renováveis. O crescimento do setor industrial era puxado pela demanda interna, uma vez que a indústria nacional servia como forma de substituir as importações (SILVA et al., 2019).

Este processo é acelerado durante a década de 50, durante o governo de Juscelino Kubitschek com o Plano de Metas, que tinha como objetivo investir em empresas estatais, na infraestrutura de transporte e energia. Nas décadas seguintes, o primeiro e segundo Plano Nacional de Desenvolvimento também focavam na substituição de importação, neste caso nos bens intermediários e de capital. O PIB da indústria de transformação apresentou um crescimento superior a três vezes entre 1967 e 1980 (MORCEIRO, 2018).

Entretanto, este modelo de desenvolvimento industrial adotado foi baseado em incentivos distorcidos em certos setores, como no segmento de bens de capital onde houve ganhos de escala e transferência de tecnologia. Além disso, os investimentos realizados trouxeram um grande endividamento do estado e a indústria nacional não tinha um desempenho exportador tão relevante quanto países de industrialização madura como os Estados Unidos e Alemanha.

A partir da década de 80 a economia brasileira passa por um processo de desindustrialização. MORCEIRO (2018), além de outros autores, destacam que este processo ocorre no Brasil de forma precoce e acelerada, diferente do que ocorreu em outros países.

³ No apêndice são apresentados detalhes sobre onze segmentos industriais: (i) ferro-gusa e aço, (ii) cimento, (iii) química, (iv) metais não-ferrosos, (v) ferroligas, (vi) mineração e pelotização, (vii) cerâmica, (viii) alimentos e bebidas, (ix) papel e celulose, (x) têxtil e (xi) outras indústrias.

Em um primeiro período entre 1981 e 1999, que se iniciou com a crise da dívida externa e a abertura comercial brasileira. Já um segundo período de desindustrialização intensa a partir de 2009 com a crise internacional de 2008, se desencadeando na crise político-econômica de 2014, culminada no *impeachment* da presidente Dilma Rouseff.

Atualmente, o PIB da indústria de transformação, corresponde a aproximadamente 15% do PIB nacional (Figura 1). Este é um dos menores valores registrados na série histórica, que teve seu ápice na década de 80, sendo superior a 35% (CNI, 2024).

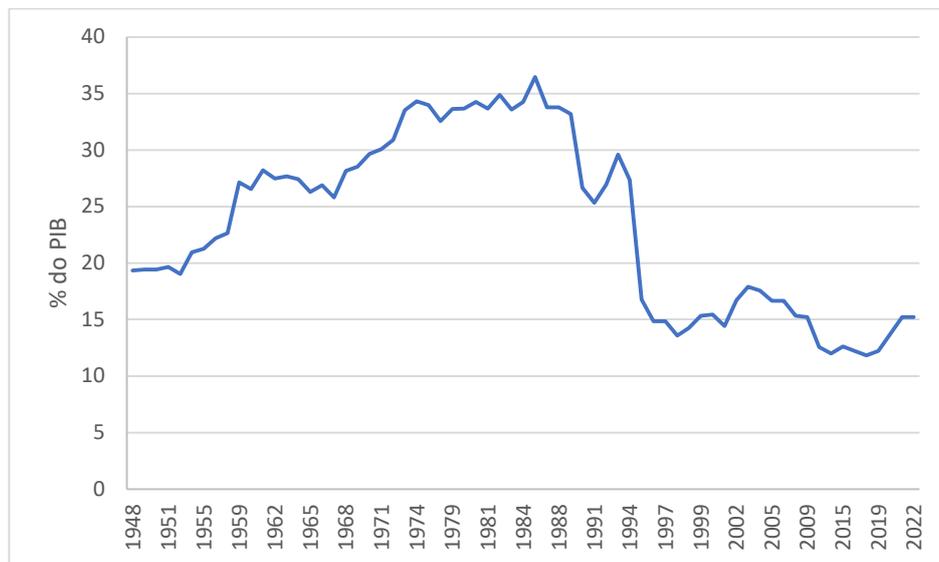


Figura 1 - Percentual do PIB da indústria de transformação no PIB nacional
Fonte: elaboração própria com base em CNI (2024).

Atualmente, os segmentos mais relevantes da indústria nacional é a produção de alimentos, metalurgia, derivados de petróleo e biocombustíveis e química, totalizando cerca de 46% do PIB do setor (Figura 2). Este perfil é reflexo da elevada participação das atividades agrícolas e extrativa do país. O Brasil é um dos maiores produtores de alimentos no mundo com cerca de com um valor de produção de quase um trilhão de reais (SEBRAE, 2023). O país também ocupa posição de destaque na mineração, possuindo uma das maiores produções de minério de ferro e a segunda maior reserva no mundo (NATIONAL MINERALS INFORMATION CENTER, 2022).

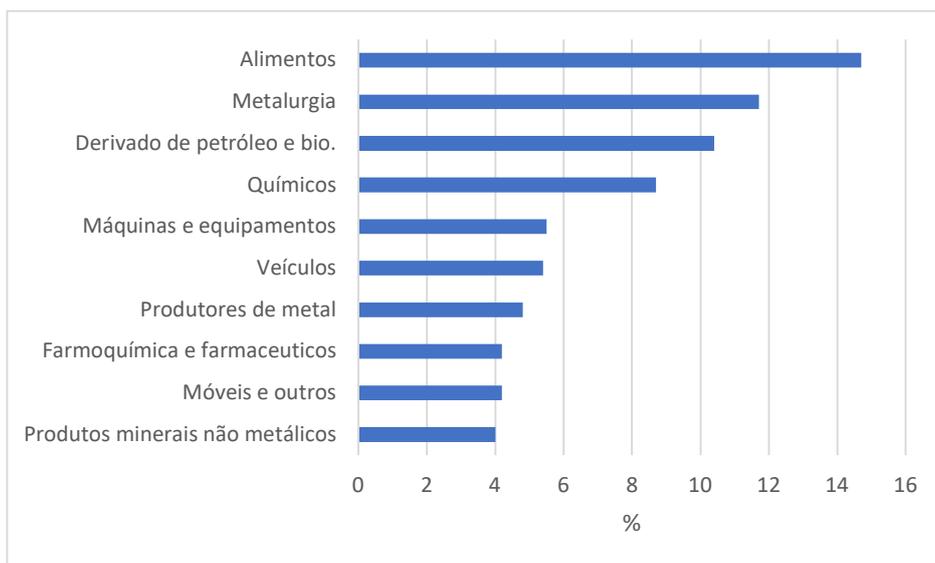


Figura 2 - Participação de segmentos industriais no PIB da indústria de transformação
 Fonte: elaboração própria com base em CNI (2024).

2.2. Perfil energético

A crise da indústria pode ser vista também no nível de consumo energético do setor (Figura 3). De 2005 até 2008, a demanda de energia no setor cresceu 12%, caindo de 82.000 ktep para 75.000 ktep em 2009 com o agravamento da crise internacional (EPE, 2023a). A partir de 2010 o setor teve seu consumo energético praticamente estagnado até 2014, ano da crise econômico-política. Novamente, o consumo de energia cai até 2019, quando retoma seu crescimento. Entretanto, até 2022 a demanda de energia do setor ainda é inferior ao maior valor registrado 2011.

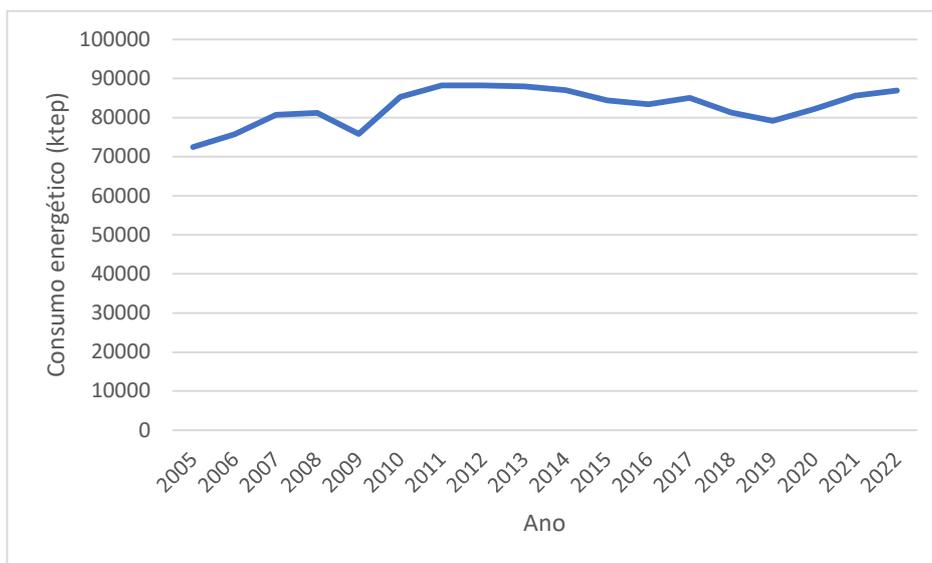


Figura 3 - Consumo energético industrial entre 2005 e 2022.

Fonte: elaboração própria com base em EPE (2023b).

Em relação à matriz energética do setor, a indústria brasileira se destaca pela elevada participação de fontes não-fósseis (Figura 4). Fontes de biomassa, como carvão vegetal, lixívia e bagaço-de-cana somam 32% de todo consumo energético industrial, fruto da elevada participação destas fontes nos setores de ‘Alimentos e bebidas’, ‘Papel e celulose’ e ‘Ferro-gusa e aço’, principalmente. Estes setores, além de serem um dos maiores consumidores de energia, também possuem alta participação de renováveis. Além disto, o consumo de eletricidade, que no Brasil é abastecido por cerca de 90% de fontes renováveis, é responsável por 22% do consumo de energia no setor. Além disso, outras fontes renováveis, como biodiesel e solar somam mais 11% na participação de renováveis ao setor. Juntas as energias não-fósseis chegam a 66% do consumo energético industrial. Desta forma, mais da metade do consumo de energia da indústria apresenta caráter renovável.

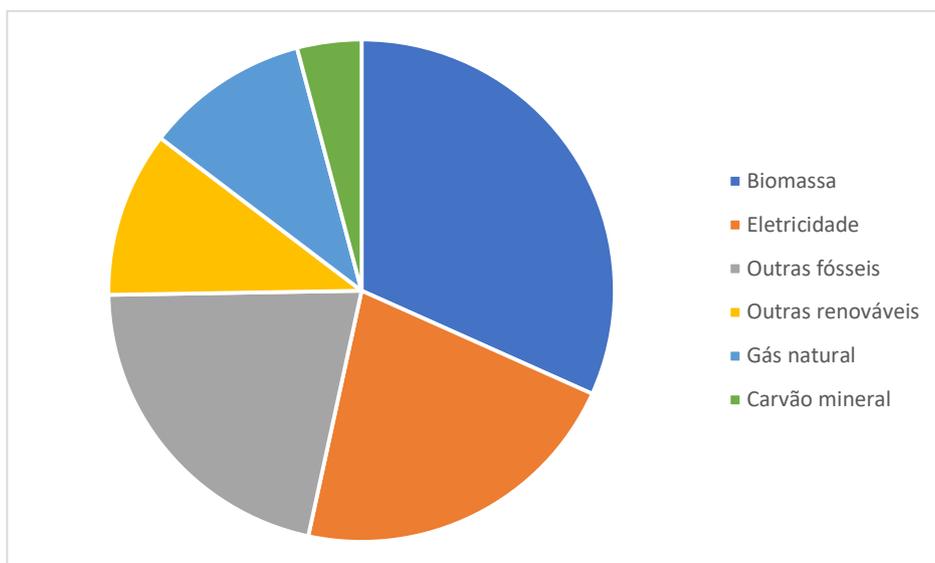


Figura 4 - Perfil energético da indústria de transformação brasileira em 2022

Fonte: elaboração própria com base em EPE (2023b).

O perfil da indústria se reflete na participação de seus segmentos em seu consumo energético (Figura 5) (EPE, 2023b). A indústria de ‘Alimentos e Bebidas’ e ‘Ferro-gusa e Aço’, duas das principais atividades da indústria de transformação, aparecem como os maiores consumidores de energia do setor. Juntos, correspondem a quase metade da demanda de energia da indústria de transformação. O setor de ‘Papel e celulose’ aparece em seguida, representando 18% do consumo de energia na indústria.

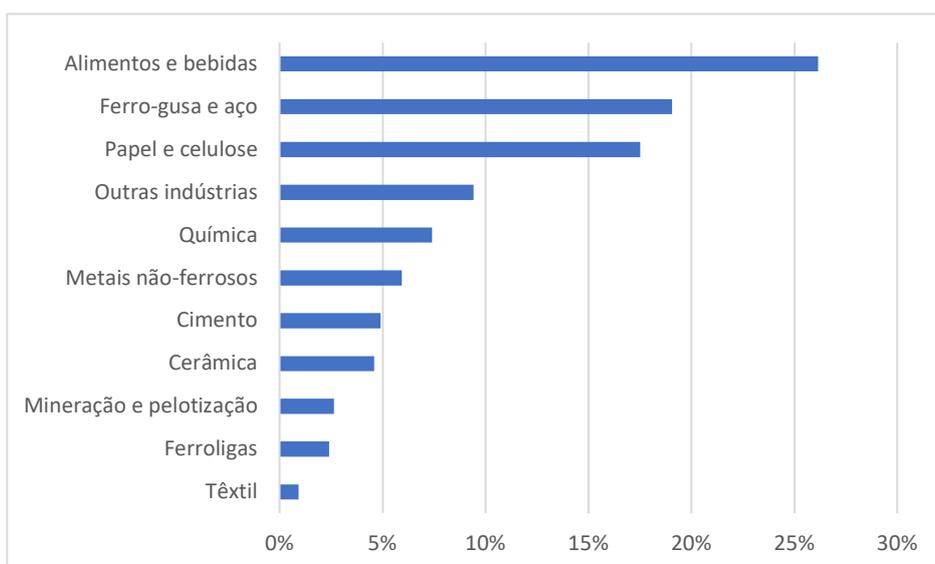


Figura 5 - Participação dos segmentos industriais no consumo energético do setor em 2022

Fonte: elaboração própria com base em EPE (2023b).

2.3. Perfil de emissões

A maior parte das emissões de gases de efeito estufa no mundo são provenientes da queima de combustíveis fósseis para geração de energia. O setor industrial é responsável por 34% das emissões globais (BASHMAKOV, I.A. et al., 2022). No Brasil, este perfil não se repete. As emissões de Uso do Solo e Mudança do Uso do Solo (AFOLU em inglês) correspondem a mais de 40% das emissões totais devido ao grande nível de desmatamento e a elevada produção agrícola. As emissões de energia (inclui consumo energético industrial) aparece em segundo lugar (20%), em terceiro as emissões de processos industriais e uso de produto (IPPU em inglês) com 5% e as emissões de resíduo respondem a 4% do total (MCTI, 2023; SEEG, 2023).

Desde 2010, ano em que foi estabelecido a primeira meta de redução de emissões pelo Plano Nacional sobre Mudança do Clima, as emissões de GEE crescem gradualmente (Figura 6) (SEEG, 2023). Nos 10 anos seguintes, houve um aumento de 33% nas emissões totais puxada principalmente pelo aumento do desmatamento e pelo setor agropecuário. Nesse mesmo período as emissões do setor industrial permaneceram no mesmo nível.

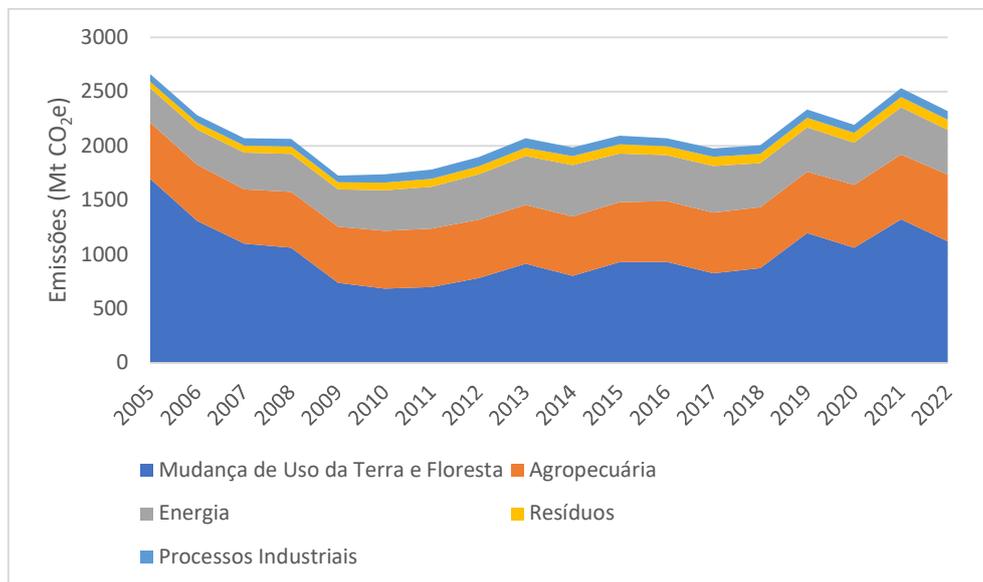


Figura 6 - Emissões de GEE do Brasil entre 2005 e 2022

Fonte: elaboração própria com base em SEEG (2023)

As emissões industriais tiveram um incremento de 9% no intervalo de 2005 a 2022, em termos absolutos, de 132 MtCO₂e em 2014 para 145 MtCO₂e em 2022. Este valor

constitui aproximadamente 6% das emissões totais do Brasil durante o último ano do referido período, de um total de 2.318 MtCO₂eq. Para se ter uma noção melhor das emissões industriais, pode-se comparar os setores excluindo as atividades ligadas ao desmatamento. Desta forma o percentual das emissões industriais corresponde a cerca de 12%. Nesta situação, a indústria brasileira figura como a principal fonte de emissões no contexto nacional (SEEG, 2023).

A Figura 7 exibe as emissões provenientes da indústria brasileira em termos de energia, processos industriais e uso de produtos, abrangendo o intervalo temporal de 2005 a 2022. Para além do aumento constatado nas emissões entre o primeiro e último ano do período em análise, observa-se uma diminuição no intervalo de 2010 a 2022. Esta redução pode ser atribuída à contração do nível de produção industrial, uma consequência direta da crise econômica que assolou o Brasil desde 2014 (SEEG, 2023).

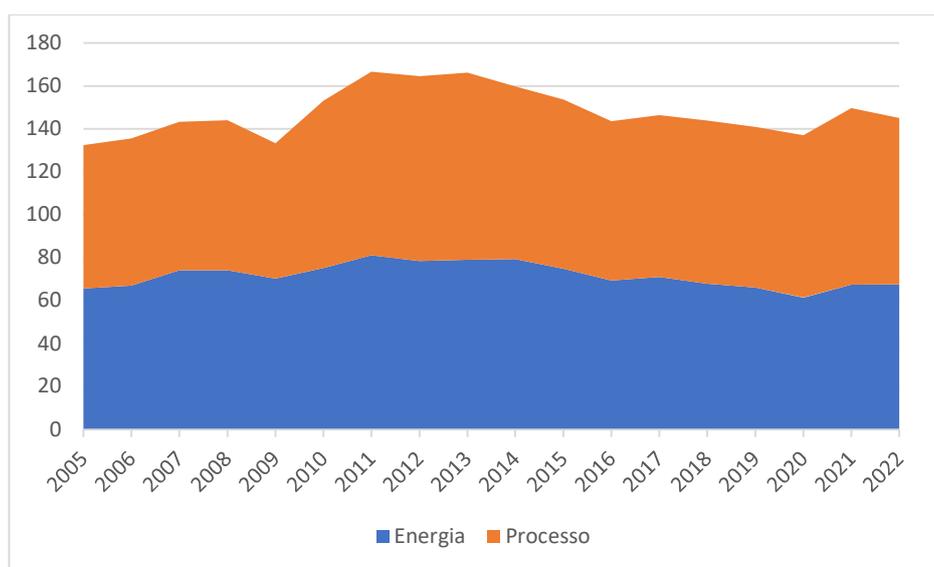


Figura 7 Emissões industriais brasileiras entre 2005 e 2022.

Fonte: elaboração própria baseado em SEEG (2023)

O comportamento das emissões apresenta uma leve diferença em relação ao consumo energético (Figura 8). Os setores de ‘Alimentos e bebidas’ e ‘Papel e celulose’, entre os maiores consumidores de energia, caem de relevância em termos de emissões (SEEG, 2023).

Estes segmentos industriais não são caracterizados por processos intensivos em energia, além de possuírem uma matriz energética com alta penetração de renováveis.

Em contrapartida, os segmentos de ‘Ferro-gusa e aço’, ‘Cimento’ e ‘Química’ se destacam entre os três maiores emissores. Juntos, estes três segmentos são responsáveis por quase 75% das emissões do setor industrial⁴. Além destes setores serem intensivos no uso de energia, eles possuem intensidade de emissões mais elevadas devido as emissões que ocorrem nos seus processos. Como por exemplo, na fabricação de cimento tem como processo intermediário a calcinação ou na redução do minério de ferro em ferro-gusa, ambos processos liberando CO₂.

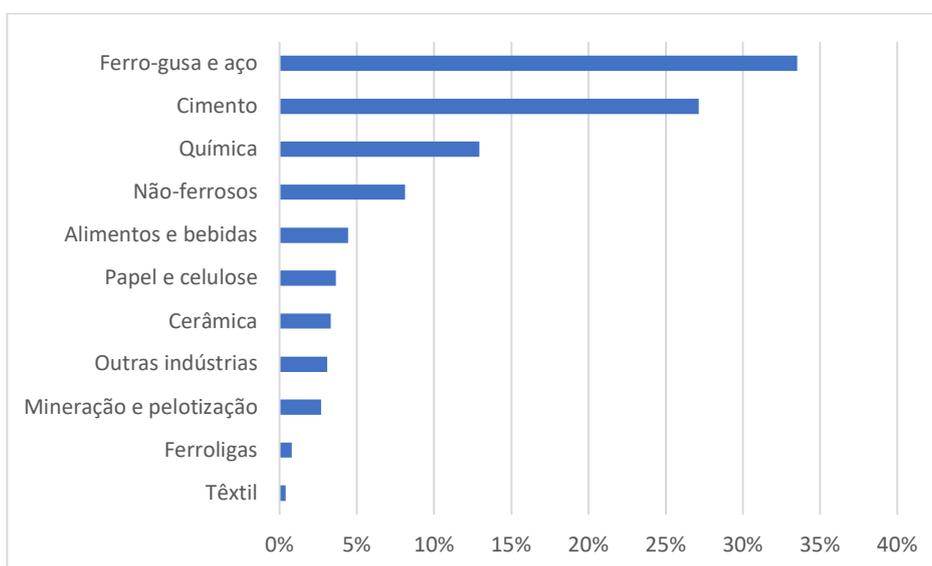


Figura 8 - Participação dos segmentos industriais nas emissões do setor em 2022

Fonte: elaboração própria baseado em SEEG (2023)

⁴ Exclui-se deste somatório as emissões de gases fluorados em aparelhos de ar-condicionado e refrigeração, normalmente categorizados dentro das emissões de IPPU.

3. Medidas de mitigação para a indústria

Nesta seção serão abordadas as principais medidas que podem ser utilizadas a fim de reduzir as emissões de GEE no setor industrial. Estas tecnologias serão apresentadas de acordo com os segmentos a quais elas podem ser aplicadas, dando destaque àqueles que representam a maior parte das emissões da indústria brasileira: ferro-gusa e aço, cimento e química.

Em linhas gerais, medidas de mitigação para o setor industrial podem ser agrupadas em (i) eficiência energética; (ii) substituição de combustíveis; (iii) outras melhorias em processo. A primeira, refere-se a tecnologias que podem ser implementadas na atual estrutura industrial e que tem como resultado a redução do consumo específico. A substituição de combustíveis visa mudar o tipo de combustível utilizado na geração de energia de um determinado segmento industrial. Normalmente, esta substituição não pode ser feita sem modificação ou substituição do equipamento que consome o combustível fóssil. Por fim, outras melhorias em processo agruparão todas aquelas tecnologias que não se enquadram nestas duas categorias, como é o caso da Captura de Carbono.

Vale mencionar que medidas de mitigação para o setor industrial chegam a centenas. Caso o leitor tenha interesse em explorar um vasto catálogo de tecnologias, o *ETP Clean Energy Technology Guide* da IEA (2023a) possui um banco de mais de 500 tecnologias sendo 158 focadas no setor industrial. Além deste, pode-se destacar o *Opções de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) em Setores-Chave do Brasil* que compilou tecnologias de eficiência energética e outras inovadoras nos setores da economia brasileira, em especial nos onze segmentos que compõe a indústria (MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE, 2017a).

3.1. Ferro-gusa e aço

Como fora mencionado, o setor de ferro-gusa e aço é um dos principais emissores de gases de efeito estufa no mundo e dentre aqueles do setor industrial no Brasil. As tecnologias de mitigação de GEE neste setor se concentram na redução do consumo de combustíveis fósseis, como medidas de eficiência energética, na utilização de rotas tecnológicas de baixo carbono para produção de aço e a utilização de captura de carbono. Nesta seção, serão abordadas as

tecnologias tidas como mais promissoras com base nos mais relevantes estudos que vem sendo publicado sobre o tema.

Eficiência energética na produção de aço

A intensidade energética da indústria de ferro-gusa e aço no Brasil é de aproximadamente 21 GJ/t de aço, valor 10% maior do que a média global (IEA, 2020a). Ao olhar a intensidade energética por rota tecnológica, a produção da via integrada com rota a carvão mineral possui uma intensidade de 18,6 GJ/t, com carvão vegetal 23,4 GJ/t.

Alguns estudos mostram que o setor ainda possui margem para ganhos de eficiência energética. EPE (2018a) apresenta que o setor tem um potencial de redução de 23% do seu consumo de energia na produção de ferro-gusa e um potencial de 10% na produção de aço. Já em PINTO *et al.* (2018), os autores mostram que a indústria siderúrgica nacional pode reduzir em 16% as emissões de GEE, sendo que mais de 75% das medidas a serem utilizadas possuem um custo inferior a 50 \$/tCO₂e.

Existe uma vasta literatura sobre o potencial de mitigação de medidas de eficiência energética na indústria. Além destes dois supracitados que atuam focado na siderurgia brasileira há estudos como ATES (2015); HASANBEIGI *et al.* (2013a); KARALI; XU; SATHAYE (2014); MILFORD *et al.* (2013); MORROW *et al.* (2014); MOYA; PARDO, (2013); PARDO; MOYA (2013); ROJAS-CARDENAS *et al.* (2017); WORRELL *et al.*, (2010); ZHANG *et al.* (2017).

Forno a Arco Elétrico

Como fora mencionado na caracterização da siderurgia, a tecnologia EAF é uma das formas tradicionais de produção de aço. Aqui ela se destaca como uma medida de mitigação pela sua baixa intensidade de emissões quando comparado com a rota tradicional, cerca de três vezes inferior (HASANBEIGI; SPRINGER, 2019). Atualmente no Brasil seu uso é menor quando comparado com outros grandes produtores. Enquanto Índia, Estados Unidos e México possuem mais de 50% da sua produção com essa tecnologia, o país sul-americano tem apenas 25%. Além disso, considerando o baixo índice de emissões da geração de energia elétrica brasileira, esta tecnologia pode apresentar maior potencial de mitigação quando comparada com outros países.

Os estudos envolvendo esta tecnologia DE SOUZA & PACCA, (2021) fazem uma análise do potencial de mitigação dela considerando a oferta de sucata como fator restritivo para expansão dessa tecnologia. Os autores encontraram que o EAF pode aumentar sua participação para 36% da produção nacional de aço, o que resultaria em uma redução de 20% nas emissões totais até 2050.

Rota integrada a carvão vegetal

A produção de aço com carvão vegetal é uma tecnologia amplamente utilizada na produção nacional que gera destaque internacionalmente (IABR, 2021a). O carvão vegetal representa cerca de 18% da energia consumida no setor, entretanto, este é um dos menores valores da série histórica brasileira, que já teve cerca de 40% do consumo energético vindo desta fonte (EPE, 2021).

O trabalho realizado por PINTO; SZKLO; RATHMANN (2018a) estudou o potencial de mitigação utilizando a tecnologia de carvão vegetal. Na análise dos autores, esta produção crescerá para 21% do total nacional até 2050, representando uma redução de 11% nas emissões de GEE.

Redução Direta

A redução direta consiste na produção de aço utilizando um gás redutor sem que haja fusão do minério de ferro. Na produção tradicional, o carvão mineral é introduzido junto com o minério de ferro dentro do reator para realizar a redução do minério, transformando-o em ferro-gusa. Na redução direta um gás redutor é introduzido em contracorrente com o minério de ferro, reduzindo-o e obtendo o produto intermediário chamado ferro de redução direta (ou Direct Reduced Iron, em inglês) (MIDREX, 2018; RIBEIRO et al., 2015). Este produto pode ser inserido em um forno à arco elétrico para produção de aço. O DRI pode ser resfriado (CDRI) e transportado para uma planta de EAF adjacente. Outra forma de trabalhar o DRI é briqueá-lo e resfriá-lo, gerando o Hot Briqueted Iron (HBI). Este produto possui uma porosidade inferior ao DRI, diminuindo os efeitos causados pela oxidação e os riscos de inflamabilidade (RIBEIRO et al., 2015). Desta forma, é a melhor maneira de transportar este produto intermediário para distâncias maiores.

Para obter este gás, é necessário realizar uma etapa de reforma se a matéria prima for carvão ou gás natural. Nesta etapa, o gás natural ou o carvão entram em contato com CO_2 , O_2 ou H_2O gerando uma mistura chamada de gás de síntese (RIBEIRO et al., 2015). Este gás é formado majoritariamente por hidrogênio e monóxido de carbono. Outro gás que pode ser utilizado como redutor é o hidrogênio (VOGL; ÅHMAN; NILSSON, 2018; WANG et al., 2021). Atualmente, define-se a qualidade ambiental do hidrogênio levando em consideração a fonte que o formou. Se combustíveis fósseis foram a matéria prima originária, o hidrogênio é considerado cinza. Quando a produção deste gás é feita pelo processo de eletrólise da água, chama-se hidrogênio verde, no caso de a eletricidade ser proveniente de fontes renováveis.

Existem diversas tecnologias que usufruem da técnica de redução direta. Neste capítulo serão tratadas aquelas mais consolidadas e as que apresentam algum destaque pelas suas inovações. A principal dessas tecnologias é a MIDREX (MIDREX, 2019). Com início de sua produção em 1970, hoje ela é responsável por 60% da produção total de DRI. A formação do ferro reduzido acontece dentro do reator de cuba. Este reator pode ser dividido em duas fases, na zona superior onde acontece a redução e zona inferior onde acontece o resfriamento. O minério de ferro em pelotas é carregado no topo do reator onde entrará em contato com o gás de síntese em contracorrente, alimentado na zona superior. O gás de topo ($\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}$) é recuperado e tratado para ser reinserido no processo para obtenção de gás de síntese (MIDREX, 2018, 2019).

A segunda rota de produção mais importante é o processo Hyl-Energiron (TENNOVA HYL, 2014). Ele é análogo ao processo Midrex: um forno onde acontece a redução separado em uma zona de redução e outra zona de resfriamento com injeção do gás redutor em contracorrente ao minério de ferro peletizado. Entretanto, a principal diferença se concentra no reformador. No processo Hyl-Energiron a reforma é feita com vapor de água em excesso, seguida por uma etapa de resfriamento para remover água do gás de síntese. Teoricamente, ambos processos possuem mesma intensidade energética de 9.6 GJ/t de ferro-esponja.

ULCORED é um processo de redução direta do minério de ferro otimizado para recuperação de dióxido de carbono (KNOP; HALLIN; BURSTROM, 2019; RIBEIRO et al., 2015). Diferente do MIDREX e HYL-ENERGIRON, este processo não necessita etapa de

reforma do gás natural. Ao invés disso, utiliza uma unidade de oxidação parcial e *shifter* para produção de hidrogênio, ambos gases redutores.

Apesar da redução direta ser uma técnica bastante conhecida, novos processos estão surgindo. A redução direta que utiliza hidrogênio é vista como uma das tecnologias mais promissoras para a descarbonização do setor. Esta tecnologia pode proporcionar uma produção de aço nula em emissões se a obtenção do hidrogênio utilizar energias livres de carbono. Entretanto, um dos principais empecilhos é o custo. Produzir hidrogênio a partir da eletrólise da água é um processo intensivo em energia elétrica. Para que esta tecnologia seja viável, o custo da energia elétrica precisa ser competitivo (VOGL et al., 2018).

Alguns estudos analisaram o potencial desta tecnologia no âmbito internacional, estudando os desafios e oportunidades para sua implementação, seus custos de mitigação e o potencial de redução de emissões de GEE que esta tecnologia poderá ter (BHASKAR; ASSADI; SOMEHSARAEI, 2020; VOGL; ÅHMAN; NILSSON, 2018; VOGL; OLSSON; NYKVIST, 2021; WANG et al., 2021).

Fusão Redutora

A tecnologia de fusão redutora vem ganhando destaque nos últimos anos (FAN; FRIEDMANN, 2021). Esta rota reduz o minério de ferro sem utilizar alto forno. Em linhas gerais, este processo divide a etapa que seria feita no alto-forno em duas: um pré-aquecimento do carvão e uma pré-redução do minério de ferro. Esta estrutura tecnológica gera um processo que possui um consumo 20% inferior à da rota BF-BOF. Além disso esta tecnologia apresenta uma sinergia com CCS pois produz um gás rico em CO₂, facilitando a sua captura (AN et al., 2018; IEA, 2020a).

Pode-se destacar algumas empresas que desenvolvem a fusão redutora como HIsarna, Corex, Finex e TecnoRed (ARENS et al., 2017; FAN; FRIEDMANN, 2021; IEA, 2020a; TECNORED, 2021). Sendo esta última, uma tecnologia desenvolvida no Brasil que é capaz de utilizar carvão vegetal como forma de reduzir o minério de ferro (TECNORED, 2021). A empresa já possui uma unidade piloto em operação em São Paulo e atualmente está construindo sua primeira unidade industrial (VALE, 2022).

3.2. Setor de cimento

A emissão de gases de efeito estufa no setor de cimento acontece tanto pela queima de combustíveis fósseis como também pelas reações químicas que acontecem durante a etapa de calcinação. Desta forma, as medidas de mitigação que são aplicáveis ao setor podem ser divididas naquelas que reduzirão o consumo específico de energia e o consumo de combustíveis fósseis e aquelas que alteram o processo.

Eficiência energética no setor de cimento

Em linhas gerais, há dois processos para fabricação de cimento: via úmida e via seca, sendo o primeiro é um processo mais intensivo em energia que o segundo. Atualmente no Brasil, cerca de 99% da produção de cimento é feita a partir da tecnologia mais eficiente. Além disso, este segmento é relativamente moderno com cerca de 40% do da sua produção com menos de 15 anos e com mais de 70% da produção utilizando fornos com pré-aquecedores de 4 a 6 estágios e pré-calcinadores (SNIC, 2019). Estas características geram no setor um consumo específico do setor, com cerca de 3,5 GJ/t de clínquer, similar a média global (IEA, 2018a).

Entretanto, ainda há potencial para melhorar a eficiência energética do setor. Algumas plantas em operação já apresentam consumo específico inferior a 3,0 GJ/t de clínquer, (MADLOOL et al., 2013). Isto indica uma margem de redução do consumo específico no setor brasileiro na ordem de 20%.

Neste sentido, existem diversos estudos que analisam o potencial de eficiência energética no setor de cimento, em destaque: HASANBEIGI et al. (2013b); HUANG; CHANG; FLEITER (2016); MORROW et al. (2014); PARDO; MOYA; MERCIER (2011); TALAEI et al. (2019); WORRELL; GALITSKY (2008); WORRELL; KERMELI; GALITSKY (2013); ZUBERI; PATEL (2017).

Substituição de combustíveis fósseis

A substituição de combustíveis fósseis por fontes alternativas pode ter papel central na descarbonização deste setor. Devido às altas temperaturas de operação dos fornos de calcinação, que podem chegar a 1.500°C, destruindo todos os componentes orgânicos (IEA, 2018a). Esta característica torna a utilização de combustíveis como resíduos extremamente

favorável. O setor se destaca por poder utilizar um leque amplo de resíduos como resíduos agrícolas, resíduos urbanos (*e.g.* pneus, lama de esgoto municipal) e resíduos industriais (*e.g.* resíduos da industrial têxtil, da indústria de papel, lama de processos químicos) (IEA, 2018a; SNIC, 2019; WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2009).

A SNIC avalia que os combustíveis alternativos podem chegar a 55% da matriz energética do setor até 2050 puxado principalmente pelos resíduos urbanos e industriais (SNIC, 2019). Os fornos são capazes de utilizar até 100% de combustíveis alternativos, mas há barreiras técnicas como o baixo poder calorífico dos resíduos, a concentração de cloro e outras substâncias prejudiciais ao processo limitam este potencial teórico.

Como esta tecnologia já é utilizada pelo setor, há diversos estudos que buscam analisar o potencial da oferta de resíduos que poderia ser usada como forma de mitigar as emissões de GEE (GÜERECA; TORRES; JUÁREZ-LÓPEZ, 2015; HASANBEIGI et al., 2012; LAMAS; PALAU; CAMARGO, 2013; USÓN et al., 2013; VAISBERG; MIKHAILOVA; GERASIMOV, 2017; ZIERI; ISMAIL, 2019).

Redução da razão clínquer-cimento

É durante a produção de clínquer que ocorrem as emissões do processo, fruto das reações de calcinação. Então, uma forma trivial da redução das emissões de processo é através da redução do uso do clínquer. Isso pode ser feito aumentando a quantidade de adições que são usados no cimento.

O cimento brasileiro contém um percentual de 30% de adições ao cimento, despontando da média global e de principais produtores (USGS, 2019). Há estudos que indicam que a proporção de adições pode chegar até 50% sem alterar as propriedades finais do cimento (IEA, 2018b). Para isso, é necessário utilizar materiais com propriedades hidráulicas ou pozolânicas similares, como a escória de alto-forno, cinzas volantes, materiais calcinados naturais.

As limitações que esta medida de mitigação encontra está ligada a oferta dos materiais adições. Parte desses materiais são ligados a outras indústrias, da forma que sua oferta está ligada a produção de setores como aço e carvão mineral. Outro elemento diz respeito a

regionalização. O material disponível em regiões distantes do parque produtivo de cimento pode encarecer o seu custo inviabilizando economicamente o processo (SNIC, 2019).

A substituição do clínquer gera outros benefícios. Como há a redução de sua produção, evitando as emissões de processos, há também a redução do consumo de energia necessário para produzir este material.

3.3. Setor químico

Diferente das duas indústrias apresentadas anteriormente, a Química é aquela com maior diversidade, sendo composta por centenas de produtos diferentes, o que a qualifica como um dos segmentos mais complexos para descarbonização (IEA, 2020d). Além desta característica, outros três elementos contribuem para dificultar a redução nas emissões desta indústria (IEA, 2020d). Alguns processos como craqueamento catalítico e outros processos podem chegar a temperaturas perto de 1.000°C, dificultando a substituição desta fonte de calor por alternativas como eletricidade e biomassa. As unidades produtivas costumam ter uma vida útil muito longa, cerca de 30 anos, da forma que aposentar estas unidades previamente trazem custos significativos às indústrias. A redução das emissões na indústria química não ocorre apenas em questões energéticas. O setor utiliza combustíveis fósseis como matéria prima para boa parte de seus produtos. Atualmente, não há oferta de tecnologia suficiente para garantir que os produtos da indústria química sejam feitos a partir de rotas renováveis.

Eficiência energética

Assim como nos demais segmentos, eficiência energética possui um papel na redução das emissões da indústria química. De acordo com a EPE (EPE, 2018b), o potencial de eficiência energética para a indústria química brasileira está na ordem entre 5 e 18% a depender do produto (Tabela 2).

Tabela 2 - Potencial de eficiência energética na indústria química

Produto	Potencial de eficiência energética (%)		
	Total	Elétrico	Térmico
Fertilizante	17,2%	18,4	15,1

Gás-química	5,9	7,3	6,8
Soda-cloro	4,9	4,9	6,8
Petroquímica	17,9	15,8	18,0
Alcoolquímica	7,9	15,2	2,3

Fonte: elaboração própria com base em EPE (2018b)

Em linhas gerais, existem medidas de eficiência energética aplicáveis a todos os segmentos da indústria química e outras específicas (MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE, 2017b).

Dentre as medidas transversais, pode-se citar medidas como a (i) substituição de equipamentos por outros mais eficientes, como a troca de motores e a substituição de caldeiras; (ii) podem ser implementadas medidas de otimização energética através da recuperação de calor, tecnologia *pinch* onde se aproveita a diferença de temperatura entre fluxos para esquentar ou resfriar processos, (iii) e a otimização de parâmetros operacionais de equipamentos e insumos visando a redução do consumo energético como o monitoramento e ajuste de queimadores e a redução da capacidade ociosa (MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE, 2017b).

As medidas específicas, por sua vez, se ligam aos processos de cada um dos produtos da indústria química. Como exemplo, pode-se citar a utilização de novos catalisadores, reciclagem de plástico, aumentar a seletividade das serpentinas do forno de craqueamento entre outros (MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE, 2017b).

A fim de evitar uma narrativa extensa sobre as diversas medidas de eficiência energética aplicáveis a indústria química, deixo como sugestão de leitura os trabalhos publicados por MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE (2017b) e EPE, (2018b), que apresentam dezenas destas tecnologias.

Fontes renováveis de energia e matéria prima

A utilização de fontes renováveis possui um grande potencial de mitigação na indústria química, tanto quanto fonte de energia como na redução das emissões de processo

(CHUNG et al., 2023). Devido a diversidade de processos e produtos, ser dado um enfoque apenas nas medidas aplicáveis as principais fontes de processo da indústria química brasileira: amônia e etanol.

A biomassa já é uma tecnologia utilizada pela indústria química em seus processos no mundo e no Brasil (BAZZANELLA; AUSFELDER, 2017). A Braskem possui uma planta de bioetileno com capacidade de produção de 200kt a partir de etanol que produz etileno a partir da desidratação do etileno. OLIVEIRA et al. (2020a) analisou a competitividade da produção de bioetileno no Brasil frente uma precificação de carbono.

Em relação a amônia, uma das tecnologias que mais se destaca é a hidrogênio a partir da eletrólise da água para sua fabricação. Enquanto na rota tradicional, amônia é produzida com o hidrogênio gerado a partir do gás natural, a rota com eletrólise produz o hidrogênio a partir da água (BAZZANELLA; AUSFELDER, 2017).

Outra tecnologia possível para produção de amônia é a produção via gaseificação da biomassa para produção de hidrogênio. Entretanto, diferente da primeira, esta tecnologia possui custos muito maiores do que a partir da eletrólise (IEA, 2020d)

3.4. Medidas transversais aos segmentos industriais

Cada processo industrial é constituído de um conjunto de operações e técnicas específicas para os produtos que se deseja fabricar. Sendo assim, as tecnologias mitigadoras de gases de efeito estufa para cada um dos processos também será específica. Entretanto, elas podem ser agrupadas em relação ao conceito em que ela é aplicada.

Como a principal fonte de emissões no setor industrial acontece pela utilização de combustíveis fósseis, tecnologias mais eficientes energeticamente e a substituição dos combustíveis são formas de reduzir essas emissões. Esta seção tem como objetivo apresentar, de forma geral, como essas tecnologias podem contribuir para a descarbonização do setor industrial que podem ser aplicadas ao longo de todos os segmentos que compõe a indústria. Entretanto, não serão detalhadas as tecnologias específicas a cada processo.

Eficiência energética

Como fora apresentado nas seções específicas para os segmentos de química, aço e cimento, eficiência energética é uma opção de mitigação importante para diminuir as emissões de GEE no setor industrial. Cada processo industrial apresentará medidas de eficiência energética específicas a ele. Apesar dos demais segmentos industriais também possuírem suas peculiaridades de processo, é possível generalizar algumas tecnologias de eficiência energética em algumas categorias que se aplicam transversalmente a todos.

Um deles é a otimização da combustão, que pode ser feito através da regulação da proporção entre ar e combustível, bem como a implementação de queimadores mais eficientes e o controle da combustão. Outra medida que pode ser aplicada em todos os segmentos industriais é a recuperação de calor. Ela pode ser feita através da integração de processos do calor de fluidos de alta temperatura. Nesse mesmo caminho, pode ser feita também a recuperação de vapor, que é feita a partir do aproveitamento do vapor *flash* e a recuperação de gases de exaustão de fornos.

HENRIQUES et al. (2010) em seu estudo sobre a eficiência energética na indústria brasileira analisaram o potencial, a redução das emissões e seus custos das opções de mitigação como (i) otimização da combustão, (ii) retorno de calor, (iii) retorno de vapor.

Substituição de combustíveis

Apesar da eficiência energética ser uma medida com inúmeros benefícios para o setor industrial, existe um limite técnico para sua implementação. Este potencial de eficiência, por sua vez, impede que estas tecnologias garantam maiores reduções de emissões no setor industrial. Desta forma, para atingir os compromissos climáticos, outras formas de geração de calor são necessárias.

A substituição de uma fonte de energia por outra está diretamente relacionada com a qualidade do calor necessário pelo processo. No setor industrial, a demanda de temperatura pode variar, tipicamente, entre valores inferiores a 100°C a até 2.000°C. De acordo com o IEA, cerca de 50% da demanda de calor pelo setor industrial demanda temperaturas inferiores a 400°C (Figura 9). Com exceção da indústria metalúrgica, cimento e química, os demais segmentos apresentam demandas de calor na faixa entre 100°C e 800°C (FRIEDMANN; FAN; TANG, 2019). Atualmente, a maior parte da demanda de energia para gerar calor na

indústria brasileira é feita a partir de fontes fósseis, apesar de haver uma alta parcela de fontes renováveis.

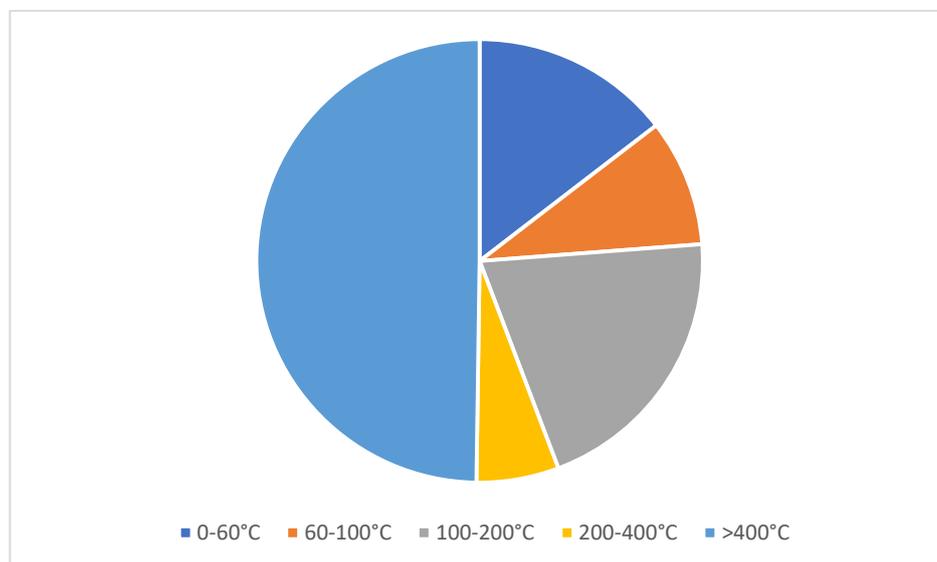


Figura 9 - Demanda de calor por faixa de temperatura no setor industrial global
Fonte: elaboração própria com base em IEA (2019)

Uma destas fontes renováveis, que já é amplamente utilizada no Brasil, é a biomassa. Ela pode ser na forma de lenha, carvão vegetal e até mesmo resíduos agrícolas. O tipo de biomassa a ser utilizado por um determinado processo é determinado pela demanda de temperatura (LENZ et al., 2020; OLSSON; SCHIPFER, 2021). Para casos em que o nível de temperatura é maior, as opções de biomassa são mais restritas. Entretanto, o calor gerado por fontes de biomassa pode chegar a até 2.200°C, sendo suficiente para processos até mesmo em indústrias intensivas como aço e cimento (FRIEDMANN; FAN; TANG, 2019).

Este combustível encontra dificuldade de difusão devido aos seus custos de logística que podem inviabilizar o projeto (DE SOUZA; PACCA, 2021). O alto percentual de biomassa na matriz energética da indústria brasileira está associado ao uso de resíduos agrícolas pela indústria de Alimentos e Bebidas, e Papel e celulose (LENZ et al., 2020; OLSSON; SCHIPFER, 2021). Para que esta tecnologia seja competitiva, é importante que a matéria-prima esteja localizada próxima dos seus consumidores.

Outra fonte de energia para geração de calor na indústria é o uso de eletricidade. Para isso, existe uma diversidade de tecnologias que podem ser aplicadas em diferentes situações, como bombas de calor e caldeiras elétricas (AGORA, 2022).

As caldeiras elétricas funcionam de forma similar aos aquecedores elétricos comuns utilizados nas residências. O calor é gerado a partir de eletrodos em contato direto com o meio a ser aquecido. Para estas tecnologias, temperaturas podem chegar a valores superiores a 500°C (AGORA, 2022). Destaca-se a elevada eficiência deste tipo de equipamento, com valores próximos de 100%.

As bombas de calor operam a partir de calor residual ou do calor ambiente. Um fluido de operação que circula em um ciclo fechado absorve a temperatura a baixa pressão e, após passar por um compressor, tem sua temperatura aumentada (AGORA, 2022). Por sua vez, o calor contido neste fluido em alta temperatura é transferido para ser utilizado pelo processo. O fluido é novamente despressurizado, causando a queda de temperatura para absorver novamente o calor do meio.

A atual tecnologia das bombas de calor permite que sejam alcançadas temperaturas entre 100 e 200°C. Mas é possível que maiores temperaturas sejam atingidas dependendo do processo.

Captura e Armazenamento de Carbono

Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) é uma das tecnologias mais discutidas como opção de mitigação de GEE. Ela pode ser definida como “o retorno do CO₂ da combustão, de processo ou do ar ambiente para geosfera” onde ficará armazenado por milhares de anos. Há também a possibilidade de uso (CCU – *Carbon Capture and Use*), onde o CO₂ emitido de um processo é utilizado em outro. Os setores que mais se destacam para o uso desta tecnologia é a geração de energia e a indústria pois ambos produzem grandes quantidades de CO₂ e em alta concentração (BASHMAKOV et al., 2022). Dentre os segmentos industriais, aqueles mais relevantes em relação a CCS é a indústria de aço, cimento e química (ROCHEDO et al., 2016)

Em linhas gerais, as tecnologias de captura de carbono são baseadas em três processos principais: (i) pós-combustão, (ii) oxy-combustão e (iii) pré-combustão. Elas são aplicadas em função das características técnicas em que o GEE é gerado.

Na pós-combustão, a captura de carbono é feita a partir da separação do CO₂ dos demais gases gerados na combustão de um combustível, como o nitrogênio, SO_x e NO_x, a partir de processos físicos ou de absorção/adsorção química (CHAO et al., 2021).

A oxy-combustão é um processo em que o combustível é queimado com oxigênio ao invés de ar. Isto favorece a separação do CO₂ uma vez que a proporção de gases como nitrogênio são menores. Entretanto, existe a necessidade de instalar uma unidade de separação do oxigênio do ar, o que implica maiores custos de investimento e manutenção, além de maior corrosão e entupimento (CHAO et al., 2021).

Por fim, existem os processos de pré-combustão, onde o combustível é parcialmente oxidado formando gás de síntese, mistura composta de H₂, CO e CO₂. Desta mistura, o dióxido de carbono é removido resultando em um gás rico em hidrogênio (EPE, 2023b; IEA, 2023d).

Após a etapa de captura, o gás ainda precisa ser transportado, armazenado ou utilizado. Este armazenamento pode ser feito em diversos tipos de estocagem subterrânea, que diferenciam entre si através das suas propriedades geológicas. Como exemplo, podemos citar “reservatórios de óleo e gás, de campos ativos ou depletados; formações geológicas contendo água altamente salina (reservatórios salinos); jazidas de carvão não mineral; folhelho rico em matéria orgânica e basalto” (EPE, 2023b).

Em relação ao uso, o dióxido de carbono capturado pode ser transformado em produtos de com alto valor agregado, como combustíveis, materiais de construção ou químicos. Atualmente, cerca de 130 Mt de CO₂ são utilizados todo ano para produção de ureia e 80 Mt para aumentar a recuperação de petróleo. A produção de combustíveis sintéticos tem sido uma das novas rotas de uso de CO₂ que vem ganhando protagonismo, com algumas unidades já em operação (IEA, 2023d). Em relação ao setor industrial, em dezembro de 2022 a ArcelorMittal anunciou um projeto em uma de suas plantas de aço para captura e uso de carbono na produção de etanol, que pode ser base para outros produtos da indústria química (ARCELORMITTAL, 2022).

BF-BOF com CCS é uma medida de mitigação que se destaca nos planos de descarbonização do setor siderúrgico (EUROFER, 2013; IEA, 2020a). Durante a etapa de

redução do minério de ferro em ferro-gusa, o gás que sai do topo da caldeira pode ser recuperado. O processo Ulcos (*Ultra Low Carbon Dioxide Steelmaking*) consiste em capturar este gás, separando o dióxido de carbono dos demais gases, que serão reinjetados no forno para ampliar a eficiência do processo.

Esta tecnologia pode contribuir com vastas reduções de emissões na produção da indústria de aço e cimento (PINTO; SZKLO; RATHMANN, 2018a; ROCHEDO et al., 2016). A indústria de cimento, que possui menos opções ligadas a mitigação das suas emissões de processo, a captura de carbono é fundamental (IEA, 2018a; SNIC, 2019). Entretanto, o custo alto de investimento é um empecilho para o seu avanço. Outro ponto relevante que pode limitar é a falta de infraestrutura necessária para o transporte e armazenamento de CO₂. Isto restringe esta tecnologia a apenas sítios industriais próximos de locais de armazenamento.

É importante destacar que atualmente no Brasil tramita no congresso federal o Projeto de Lei 1425/2022 que regulamenta sobre as atividades de armazenamento e uso de dióxido de carbono (BRASIL, 2022a).

4. Modelagem energética e de emissões

Modelos constituem em uma estrutura matemática com o objetivo de representar a realidade e responder a questões propostas (GRUBB et al., 1993; VAN BEECK, 1999). A partir de premissas e uma análise histórica, pode-se analisar quais são as expectativas futuras. O primeiro choque de petróleo na década de 1970 fomentaram o uso de modelos energéticos. Algumas perguntas relacionadas a demanda de energia passavam a ser cruciais para o planejamento das empresas de energia e do estado. Qual o impacto causado da mudança dos preços de um produto energético e do poder aquisitivo na demanda de energia? Com base no perfil do comportamento histórico, como as expectativas futuras de comportamento podem afetar no consumo de energia? Na perspectiva de redução dos impactos causados pelo consumo de energia, como se pode reduzi-los e como o consumo será influenciado? (HOURCADE et al., 1996; RYAN; PLOURDE, 2009).

A modelagem energética é uma das principais ferramentas no planejamento energético. Ajuda a explorar caminhos futuros, trazendo entendimento sobre a demanda e a oferta de energia, os impactos de políticas energéticas e ambientais. E como qualquer ferramenta, cada modelo possui características específicas adequadas para responder a perguntas específicas (PRINA et al., 2020; VAN BEECK, 1999). Modelos energéticos podem ser agrupados de acordo com seus objetivos gerais: (i) prever o futuro, (ii) explorar o futuro e (iii) olhar do futuro ao presente (*backcasting*).

Modelos com o objetivo de prever o futuro são elaborados através de uma análise histórica das informações pertinentes. Extrapolando o comportamento passado, projeta-se o comportamento futuro. O segundo tipo de objetivo de modelagens se refere à análise de cenários. Através de premissas que implicam mudanças em uma determinada tendência, diversos futuros são concebidos e analisados. *Backcasting* constitui no exercício de construir uma visão desejada para um determinado horizonte de tempo baseada nas necessidades de mudanças que devem ser feitas para se alcançar o objetivo estipulado (VAN BEECK, 1999)

Podemos listar alguns objetivos dos modelos de energia em função do problema que eles querem estudar: (i) modelos de demanda de energia, que visam entender a demanda da economia ou de um setor é influenciada por aspectos sociais, econômicos ou técnicos; (ii)

modelos de oferta de energia, que costumam focar no caráter técnico da geração de energia dado uma demanda específica; (iii) modelos de impacto que podem ser utilizados para entender o impacto de políticas públicas, condições ou restrições ambientais, entre outras (VAN BEECK, 1999).

Com o avanço do poder de computação, os modelos passaram a se tornar mais complexos (PRINA et al., 2020; RYAN; PLOURDE, 2009; VAN BEECK, 1999). Além disso, o crescente debate acerca dos impactos ambientais e as mudanças climáticas causadas pelas emissões de combustíveis fósseis contribuiu para o surgimento de novos modelos e sua complexidade (HOURCADE et al., 1996; PRINA et al., 2020)

Para se entender o estado da arte da vasta e diversa modelagem energética, é preciso compreender quais são as classificações dos modelos. Além disso, a classificação deles ajuda a aprimorar a escolha de qual ferramenta deverá ser utilizada para o que se quer estudar (VAN BEECK, 1999).

GRUBB et al. (1993) apresenta uma das primeiras classificações de modelos energéticos. Segrega-os em duas categorias: (i) *bottom-up* e (ii) *top-down*. Essas duas categorias estão relacionadas com a perspectiva na qual os modelos são construídos. A modelagem *bottom-up* é desenvolvida através da ótica tecnológica, onde o consumo e demanda de energia são respondidos pelas tecnologias que constitui um determinado sistema. Já a modelagem *top-down* é uma representação econômica do sistema energético, que permite a conexão com o sistema econômico como um todo. Essas duas abordagens são comumente aludidas como abordagem de engenheiros e abordagem de economista.

Em relação a metodologia, estes modelos podem ser classificados em dois grupos: simulação e otimização (PRINA et al., 2020). Os modelos de simulação podem ser definidos como uma representação matemática que visa simular e analisar o comportamento de um sistema sob condições definidas específicas (LUND et al., 2017). Eles podem ser utilizados para comparar opções tecnológicas ou cenários que se diferenciam entre si com base em parâmetros como oferta de energia, custos, emissões (LUND et al., 2017). Já os modelos de otimização apresentam uma abordagem que visa minimizar ou maximizar uma função objetivo sujeito a um conjunto de restrições. Nestes modelos, a solução que ele busca

encontrar pode ser a minimização de custos, de impactos ambientais ou maximização de lucro de uma atividade econômica.

Os modelos também podem ser categorizados em função de critérios como os setores que ele engloba, a cobertura geográfica, o horizonte temporal, a metodologia e a técnica de programação (IPCC, 2022).

Para a análise das complexas relações entre energia, emissões de gases de efeito estufa e a sociedade, há um conjunto de modelos chamados de Modelos de Análise Integrada (*Integrated Assessment Models – IAMs*) que tem como objetivo estudar as interações econômicas, sociais e ambientais. Estes modelos são utilizados pelo IPCC como referência para entender os caminhos das emissões globais de GEE nos seus diversos cenários (IPCC, 2022). Esses modelos se diferenciam entre si nos mesmos quesitos já apresentados: representação geográfica, setorial, espacial e temporal; ou, em outras palavras, as premissas metodológicas que compõem seus respectivos arcabouços econômicos, técnicos e sociais.

A Tabela 3 apresenta um resumo de diversos IAMs que são destacados pelo IPCC (2022). Esta seleção traz apenas aqueles que possuem alguma descrição do setor industrial, considerando quais são as emissões abrangidas e o tipo de tecnologia de mitigação.

Tabela 3 - Modelos de análise integrada utilizados para cenários climáticos

Modelo	Método	Subsetores	Emissões de processo	Tecnologias
AIM-CGE	CGE	Ferro-gusa e aço; química; não metálicos; alimentos; papel e celulose; e outros.	Cimento	Sem descrição
DNE – 21+	Otimização	Ferro-gusa e aço; cimento; papel e celulose; alumínio; química	Cimento, química, alumínio, aço	Com descrição
GCAM	Híbrido/Otimização	Cimento, Fertilizantes e outros	Cimento	CCS
Imaclim-R	Híbrido	Dados exógenos	-	-

IMAGE	Híbrido	Aço, Cimento	Aço e cimento	Eficiência energética e Captura de Carbono
MESSAGE	Híbrido/Otimização	Setor agregado	-	-
BLUES (MESSAGE)	Híbrido	Ferro-gusa e aço; química; não metálicos; alimento e bebidas; papel e celulose; ferroligas; mineração; cimento; cerâmica; têxtil; outras indústrias.	Aço e cimento	Eficiência energética e substituição de combustíveis
POLES	Simulação	Ferro-gusa e aço; cimento; química; não metálicos;	Cimento	-
STEM	Bottom up/otimização	Seis setores	Cimento	Eficiência energética e substituição de combustíveis

Fonte: elaboração própria com base em IPCC (2022)

Os modelos de análise integrada nem sempre são capazes de caracterizar com riqueza de detalhes os setores que os compõem ANGELKORTE (2023). Como seus objetivos são de entender as relações entre os aspectos econômicos, sociais e ambientais, a granularidade deles não permite maior compreensão sobre os pormenores tecnológicos como aqueles que são cruciais para entender a descarbonização do setor industrial.

Para preencher esta lacuna, há diversos estudos que buscam analisar as emissões e consumo energético do setor industrial. Nesta tese, serão apresentados os modelos que apresentam alguma descrição do setor industrial, indicando quais segmentos são analisados e suas metodologias. Em linhas gerais, modelos que visam estudar as emissões do setor industrial são feitos a partir da estrutura *bottom-up* por causa da necessidade da descrição tecnológica.

HASANBEIGI et al. (2013a) e HASANBEIGI; MENKE; PRICE (2010) analisaram o potencial de eficiência energética e de redução de emissões para a indústria de cimento através de um modelo de simulação *bottom-up* baseado no consumo específico do setor.

Nesse mesmo sentido, em HASANBEIGI et al. (2013a) foi feito um estudo análogo, entretanto com o foco no setor de aço.

Já KARALI; XU; SATHAYE (2014) desenvolve um modelo global de otimização baseado em GAMS (General Algebraic Modelling System), com o objetivo de reduzir o custo do sistema. Chamado de Industry Sector Energy Efficiency Modeling (ISEEM), o modelo foca no setor siderúrgico e busca entender o potencial de redução de emissões de GEE a partir de políticas de eficiência energética e seus impactos no comércio internacional.

CHEN; YIN; MA (2014) utilizou o modelo bottom-up de otimização TIMES para estudar a demanda de aço, consumo energético e emissões de GEE na china entre 2010 e 2050. Este modelo desenha o consumo aparente de aço a partir de premissas geográficas e econômicas, além de descrever a indústria do aço em sete processos, considerando medidas de eficiência energética. Em MA et al. (2016) também é utilizado a mesma estrutura (TIMES) para criar um modelo com uma abordagem de análise integrada para estudar tendências de consumo energético e emissões de poluentes atmosféricos em diversos cenários, através de medidas de eficiência energética como forma de mitigação.

Em XU; YI; FAN (2016) os autores também desenvolvem um modelo bottom-up de otimização para estudar os caminhos para redução das emissões da indústria de cimento, estimando o potencial de redução das emissões e seus custos. O modelo utiliza como referência tecnologias de eficiência energética, recuperação de calor, CCS, combustíveis alternativos e substituição do clínquer.

HUANG; CHANG; FLEITER (2016) analisa o potencial de redução das emissões do setor de cimento através de um modelo de simulação. Neste modelo, os autores caracterizam as diversas etapas de produção de cimento analisam dezoito tecnologias de eficiência energética aplicadas a cada uma das etapas específicas. Similar a este estudo, ZUBERI; PATEL (2017) também analisa o potencial de eficiência energética para a indústria de cimento (aqui com foco na Suíça). Diferente de HUANG *et al.* (2016), os autores consideram os investimentos relativos à energia e estimam os custos de abatimento em função de regulamentações ambientais como taxa de carbono.

FLEITER et al. (2018) utiliza o modelo FORECAST de simulação bottom-up para entender a descarbonização do setor industrial. Este modelo busca fazer esta análise através de um arcabouço integrado que incorpora elementos (i) econômicos, como PIB, preços de energia; (ii) políticos, através da implementação de precificação de carbono; (iii) estrutura do setor industrial, como os processos; e (iv) tecnológicos como eficiência, custos de investimento. Nele são descritos sete segmentos industriais: (i) ferro-gusa e aço, (ii) não ferrosos, (iii) papel e celulose, (iv) não metálicos, (v) química, (vi) alimentos e bebidas, e (vii) outros.

Em TALAEI; AHIDUZZAMAN; KUMAR, (2018) é desenvolvido um modelo a partir do *Long-Range Energy Alternative Planning* model (LEAP) para estudar o potencial de eficiência energética e sua mitigação de GEE no setor químico. Este modelo é construído com base na produção de etileno e amônia, considerando suas principais tecnologias de produção e processos. Em um outro artigo (TALAEI et al. 2019) parte do mesmo arcabouço, porém foca agora no setor cimenteiro, através da descrição do processo a partir do consumo específico e suas respectivas emissões. Da mesma forma, os autores buscam analisar o potencial de mitigação de GEE através da implementação de medidas de eficiência energética.

OBRIST et al., (2021) aplicam um modelo bottom-up de otimização baseado em TIMES para a Suíça (*Swiss TIMES energy system Model – STEM*), que incorpora fluxos energéticos, materiais e produtos, para analisar a descarbonização do setor de cimento. O modelo descreve o perfil energético, de emissões e de materiais do setor através das principais etapas de produção. Em relação a medidas de mitigação, os autores focam em eficiência energética e CCS. Com este mesmo modelo, em um segundo trabalho, Obrist *et al.*, (2022) fazem uma análise agora focado no setor de papel e celulose.

DINGA; WEN (2022) buscam compreender um caminho para transição da indústria de cimento rumo a neutralidade climática da China. Para isso, os autores desenvolvem um modelo elaborado a partir da descrição do processo de fabricação de cimento, e utilizam o modelo GAINS para analisar os cobenefícios da aplicação de medidas de eficiência energética

ZHANG et al. (2022) estudou os caminhos para descarbonização da indústria de ferro-gusa e aço da china e seus impactos nos recursos energéticos. Para isso, os autores desenvolvem o modelo MESSAGEix-China iron and steel, que busca integrar as tecnologias do setor dentro do arcabouço do modelo MESSAGEix. O modelo conta com uma descrição detalhada do processo de produção de aço, com seus respectivos consumos de energia, recursos (minério de ferro e sucata) e emissões. Além disso, apresenta como opções de mitigação tecnologias como hidrogênio e captura de carbono.

No trabalho realizado por WORRELL; BOYD (2022), os autores estimam o potencial de mitigação de GEE na indústria de transformação. Os autores focam em oito setores, sendo sete intensivos em energia e um genérico para abranger as indústrias leves. Para estudar o potencial de mitigação, os autores analisam como quatro pilares (eficiência energética, eficiência de materiais, geração de energia elétrica, e outras específicas) influenciam nos segmentos industriais selecionados.

LEE et al. (2019) também constrói um modelo de otimização através de programação matemática positiva focado em todo o setor industrial e destrinchando em onze segmentos. O modelo desenvolvido pelo autor descreve as emissões e o consumo energético a partir dos serviços energéticos utilizados pelos segmentos industriais e que visa reduzir o custo total da produção do setor.

ROCHEDO (2016) desenvolveu um modelo integrado global de energia e uso da terra (COFFEE) que permite analisar os caminhos de cenários climáticos de longo prazo. O modelo é baseado no MESSAGE e possui a descrição dos setores de transporte, residencial e industrial. Em relação a este último, ele é descrito através dos seus 11 segmentos industriais com base nos seus respectivos serviços energéticos e emissões de processo. Similarmente, porém focado para o Brasil, o BLUES (*Brazilian Land-Use and Energy System*) é um modelo de otimização que visa reduzir os custos para o país nos mesmos setores da economia e nos mesmos onze segmentos industriais. Entretanto, nesse modelo há uma descrição maior do processo produtivo destes setores, através de seus respectivos consumos específicos.

Também focado no Brasil pode-se citar PINTO; SZKLO; RATHMANN (2018b) que desenvolveram um modelo para analisar o potencial de mitigação e os seus custos para o setor de ferro-gusa e aço. O autor descreve o setor a partir do consumo específico das

principais rotas de produção de aço e medidas de eficiência energética que podem ser aplicadas para mitigar as emissões de GEE.

A Tabela 4 traz um resumo dos artigos apresentados nesta seção com as informações sobre a forma como o modelo é estruturado, sua metodologia (simulação ou otimização) e o quais segmentos industriais são descritos.

Em linhas gerais, a maior parte dos estudos apresentam um foco maior em medidas de eficiência energética e em alguns setores específicos. Há poucos estudos que abrangem o setor industrial como um todo. Aqueles que incorporam todo o setor industrial não costumam ter um nível de detalhes maior sobre os diversos segmentos industriais (HENRIQUES; DANTAS; SCHAEFFER, 2010) ou não incorporam um leque de opções de mitigação com medidas inovadoras (CHEN; YIN; MA, 2014), permitindo uma análise de caminhos de descarbonização mais profundos.

Tabela 4 - Lista de artigos relevantes sobre modelagem bottom-up de consumo energético e emissões

Artigo	Modelo	Metodologia	Nível de descrição da indústria
(HASANBEIGI et al., 2013a; HASANBEIGI; MENKE; PRICE, 2010)	Consumo específico	Simulação	Cimento (agregado)
(HASANBEIGI et al., 2013a)	Consumo específico	Simulação	Aço (agregado)
(KARALI; XU; SATHAYE, 2014)	Modelo ISEEM (GAMS)	Otimização (minimizar o custo do sistema)	Aço (descrição da produção)
(CHEN; YIN; MA, 2014)	TIMES	Otimização (minimizar o custo do sistema)	Aço desagregado em 7 processos (não considera medidas inovadoras)
(MA et al., 2016)	TIMES	Otimização	Aço
(XU; YI; FAN, 2016)	-	Otimização (minimizar o custo do sistema)	Cimento

(HUANG; CHANG; FLEITER, 2016)	FORECAST-Industry	Simulação	Cimento
(ZUBERI; PATEL, 2017)	Consumo específico	Simulação	Cimento
(FLEITER et al., 2018)	FORECAST- Industry	Simulação	Aço, cimento, química, não metálicos, Alimentos e bebidas, Outros
(TALAEI; AHIDUZZAMAN; KUMAR, 2018)	LEAP	Simulação	Química
(ROCHEDO, 2016)	BLUES (message)	Otimização	Todos os setores econômicos (inclui 11 setores na indústria. Sem descrição tecnológica)
(LEE et al., 2019)	Consumo por tipo de equipamento (BEU)	Otimização	11 segmentos industriais (baixa descrição tecnológica)
(BHADBHADE; ZUBERI; PATEL, 2019)	Consumo específico	Simulação	Metalurgia
(TALAEI et al., 2019)	LEAP	Simulação	Cimento
(REN et al., 2021)	Consumo específico (GAMs)	Otimização	Aço
(OBRIST et al., 2021)	STEM (Times)	Otimização	Cimento
(WORRELL; BOYD, 2022)	Consumo específico	Simulação	Oito segmentos industriais
(OBRIST et al., 2022)	Consumo específico	Simulação	Papel e celulose
(DINGA; WEN, 2022)	Consumo específico	Simulação	Cimento
(ZHANG et al., 2022)	MESSAGEix-China	Otimização	Aço

Fonte: elaboração própria

5. Metodologia

Nesta seção é descrita a metodologia utilizada nesta tese para realização da modelagem de energia e emissões da indústria brasileira. Ela foi elaborada a luz dos estudos presentes na revisão bibliográfica e com um foco maior para os segmentos de (i) Ferro-gusa e Aço, (ii) Cimento e (iii) Química considerando que estes são as principais fontes de emissões. Os demais segmentos industriais serão apresentados juntos em uma seção pois apresentam um perfil similar de emissões, com foco nas de energia. Em seguida é apresentado o método para o cálculo do custo marginal de abatimento, utilizado para estimar o esforço de cada segmento para atingir os objetivos climáticos. Por fim, são detalhados os cenários a serem estudados para compreender os possíveis caminhos de descarbonização da indústria.

5.1. Modelagem Bottom-up do consumo energético e de emissões da indústria

A modelagem do consumo energético e das emissões da indústria será feita através de uma abordagem otimização *bottom-up*. Esta abordagem se define como uma caracterização matemática das tecnologias que compõe a indústria de forma a expressar a quantidade de energia consumida e as emissões produzidas.

Como visto na revisão bibliográfica desta tese, há uma vasta literatura sobre modelagem das emissões do setor industrial. Os modelos se diferenciam na quantidade de segmentos que são caracterizados, o nível de detalhes e as opções de mitigação consideradas. A maior parte dos modelos apresenta apenas medidas como eficiência energética e substituição de combustíveis. Estudos que apresentam diversidade de opções de mitigação, incluindo tecnologias inovadoras, não englobam a indústria como um todo, focando apenas em um setor. Além disso, os modelos desenvolvidos em pesquisas passadas são construídos em arcabouço de simulação, que são adequados para análise de cenários, mas perdem qualidade na análise comparativa e de custo eficiência das tecnologias e caminhos de mitigação.

Além disso, poucos são os estudos que buscam analisar a indústria brasileira. Em sua maioria, os segmentos industriais são apresentados com pouco nível de detalhamento

(ROCHEDO, 2016) ou sem a consideração de tecnologias inovadoras de mitigação (DE SOUZA; PACCA, 2021; PINTO; SZKLO; RATHMANN, 2018a).

A presente pesquisa preencherá essa lacuna. Desenvolvemos um modelo de otimização de custos *bottom-up*, baseado em software de código aberto, com uma descrição abrangente da indústria brasileira. A escolha do método *bottom-up* foi feita pois este arcabouço de modelagem é o que melhor permite caracterizar tecnologicamente um setor, e uma das perguntas a serem respondidas neste trabalho é como o setor poderá atingir suas metas de descarbonização e quais seus custos. Outro aspecto importante é a escolha do método de otimização. Apesar do método de simulação ser adequado para análise de cenários, o método de otimização permite que a escolha das tecnologias de mitigação se dê a partir de restrições e condições pré-estabelecidas. Nesse sentido, o caminho adotado pelos segmentos industriais será definido pelos parâmetros de custo das tecnologias, dos seus potenciais de mitigação e dos objetivos de redução de cada um dos cenários.

O consumo energético e as emissões do setor industrial serão modelados através dos principais segmentos que compõe a indústria, em relação ao seu consumo de energia e relevância nas emissões de GEE. O nível de detalhamento para cada um deles dependerá do nível de homogeneidade do segmento, da sua relevância para as emissões e a disponibilidade de informações. Aqueles que possuem uma diversidade de rotas tecnológicas ou produtos, serão abordados de forma mais agregada (e.g. indústria de alimentos e bebidas). Já os que apresentam poucos produtos (e.g. cimento Portland) serão representados com mais detalhes.

Primeiramente, se faz necessário delimitar os segmentos que terão seu consumo energético e de emissões representados matematicamente. Adotou-se os mesmos onze segmentos que aqueles utilizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE): (i) Ferro-gusa e aço; (ii) Cimento; (iii) Química; (iv) Alimentos e bebidas; (v) ferro-ligas; (vi) metais não-ferrosos; (vii) papel e celulose; (viii) cerâmica; (ix) têxtil; (x) Mineração e pelotização; (xi) Outras indústrias. Os três primeiros segmentos foram modelados em função das tecnologias de produção e seus principais produtos (quando houver). Já os demais segmentos, devido a menor relevância nas emissões quando comparado com os primeiros e a grande diversidade de processos e produtos, optou-se por modelá-los a partir do Balanço de Energia Útil (BEU).

Tanto as emissões de GEE devidas ao consumo de energia quanto as emissões de GEE oriundas de processos industriais e usos de produtos foram estimadas. Entretanto, como a descarbonização do setor industrial envolve a adoção de algumas medidas que mitigam GEE devidas ao uso de energia ao mesmo tempo que as emissões de processos industriais (e.g., substituição de carvão mineral por GN na siderurgia, CCS na indústria de cimento), optou-se por apresentar os resultados desta mitigação apenas em termos de CO₂e sem a distinção por origem da emissão.

Através da estrutura desenvolvida nesta tese será possível preencher algumas lacunas de conhecimento que os estudos pretéritos não preencheram. O modelo construído nesta tese descreve os onze segmentos que compõem a indústria a nível de detalhe de rota tecnológica, etapa de produção e serviço energético. A partir desta estrutura será possível ter uma percepção melhor sobre como as tecnologias podem ajudar a mitigar as emissões de GEE.

Outro ponto de destaque desta tese em relação a outros estudos é a incorporação de medidas inovadoras. Boa parte dos estudos que analisam a inserção destas tecnologias, focam em apenas um setor. Com o modelo desenvolvido nesta tese, é possível analisar comparativamente a custo-efetividade de cada um dos segmentos para atingir seus compromissos climáticos e qual é a pressão sobre cada um deles em relação a necessidade de medidas ainda em baixo estágio de maturidade.

5.1.1. Ferro-gusa e aço

A modelagem da siderurgia brasileira começa pela caracterização das suas principais rotas de produção. Foram divididas em quatro rotas de produção: (i) Alto-Forno com Aciaria a Oxigênio (BF-BOF, em inglês) utilizando carvão mineral; (ii) Alto-forno com Aciaria a Oxigênio utilizando carvão vegetal (iii) Forno a Arco Elétrico; (iv) Produção independente de Ferro-gusa. A partir desta desagregação é possível compreender o consumo energético da indústria de aço.

Em linhas gerais, a modelagem utiliza como dados de entrada a produção de aço anual e o nível de emissão limite. A partir de um conjunto de medidas de mitigação (e.g. eficiência energética, substituição de combustíveis e novos processos), o modelo busca minimizar os custos de mitigação para atingir a restrição do limite de emissões. Como resultados, a

presente modelagem retorna o perfil da produção em termos do percentual de cada tecnologia utilizada, o consumo energético por fonte e o custo total.

A empresa de pesquisa energética fornece os dados relativos ao consumo energético específico (GJ/ de aço ou de ferro-gusa) para cada uma das rotas de produção tradicional (EPE, 2018a). Na Tabela 5 - Consumo específico das rotas tecnológicas tradicionais na produção de Aço, são apresentados os consumos específicos de cada uma destas tecnologias.

Tabela 5 - Consumo específico das rotas tecnológicas tradicionais na produção de Aço

Rota tecnológica	Consumo específico
BF-BOF com carvão mineral	24.9 GJ/t steel
BF-BOF com carvão vegetal	23.1 GJ/t steel
EAF	9.8 GJ/t steel
Produção independente	16.4 GJ/t steel

Fonte: elaboração própria com base em EPE (2018a); PINTO; SZKLO; RATHMANN (2018b)

O Instituto Aço Brasil fornece dados referentes à produção aço, como o perfil por tipo de forno (BF-BOF e EAF) e produção anual (IABR, 2021b). Entretanto, não há dados explícitos sobre a produção de aço através de rota a carvão vegetal. Para estimá-lo, utilizou-se a metodologia de PINTO *et al.* (2018). que assume que o percentual de ferro-gusa produzido com carvão vegetal, fornecido pela SINDIFER (2021), é igual ao percentual de aço produzido com carvão vegetal. Por fim, a quantidade de ferro-gusa produzida de forma independente pode ser encontrada no relatório anual da SINDIFER.

A segunda etapa do modelo é a calibração do consumo específico fornecido pela EPE. Para isto, será considerado que a quantidade de energia consumida pelo setor de aço fornecida pelo Balanço Energético Nacional (EPE, 2023a) é igual à soma do produto específico e a produção de cada uma das rotas apresentadas. Desta forma, o consumo específico foi ajustado proporcionalmente a fim de manter esta igualdade.

Ferro-gusa e aço: Medidas de mitigação

Nesta seção serão abordadas as principais medidas de mitigação aplicáveis à siderurgia. Em linha gerais, há três formas principais de reduzir as emissões na produção de aço: (i) medidas de eficiência energética; (ii) utilização de rotas de baixo carbono; e (iii) captura e armazenamento de carbono. Eficiência energética abriga todas as tecnologias e técnicas que podem ser utilizadas dentro do atual parque industrial. As rotas de baixo carbono consistem em outras maneiras de obter aço diferente da produção tradicional que utiliza carvão mineral em altos-fornos. Por fim, captura de carbono pode ser implementado para diminuir as emissões sobressalentes.

Para este estudo foram consideradas 21 diferentes medidas de eficiência energética, elaboradas com base nos trabalhos de EPE (2018a); HASANBEIGI et al. (2013a); PINTO; SZKLO; RATHMANN (2018a); WORRELL et al. (2010) (Tabela 6). Cada uma destas medidas apresenta um potencial de redução na intensidade de emissão, a etapa em qual ela é aplicada e seus respectivos custos de investimento e operação. Como limite para penetração destas tecnologias no setor siderúrgico, foram utilizadas as caracterizações qualitativas em (EPE, 2018a). Neste trabalho as tecnologias são classificadas de acordo com um conjunto de critérios de aceitação. Para as medidas definidas como “amplamente utilizadas” foi definido um limite de 25% e para o restante, 100%.

Tabela 6 - Medidas de eficiência energética para o setor de Ferro-gusa e Aço

Medida de mitigação	Etapa	Redução na intensidade (Gj/t)	CAPEX (RS/t)	OPEX (RS/t)
Coke Dry Quenching	Alto-forno	0,37	115,00	5,75
Controle do oxigênio	Laminação	0,33	2,40	0,12
Drivers de velocidade variável	Laminação	0,03	0,97	0,04
Escoria espumante	Aciaria	0,07	48,00	2,40
Injeção de carvão pulverizado	Alto-forno	0,57	24,30	1,21
Injeção de gás natural	Alto-forno	0,90	23,76	1,19

Inversores de frequência	Alto-forno	0,12	1,43	0,07
Pré-aquecimento de sucata	Aciaria	0,13	24,57	1,23
Processos de automação	Aciaria	0,11	23,63	1,18
Queimadores oxi-gn	Aciaria	0,14	22,85	1,14
Queimadores regenerativos	Laminação	0,70	12,29	0,61
Recuperação de calor de água	Laminação	0,03	4,10	0,20
Recuperação de calor dos fornos	Laminação	0,30	13,23	0,66
Recuperação de calor na pelotização	Sinterização	0,09	6,89	0,34
Recuperação de calor na sinterização	Sinterização	0,55	14,81	0,74
Recuperação de gás de aciaria	Aciaria	0,55	114,98	5,75
Recuperação de gás natural de alto-forno	Aciaria	0,07	1,39	0,07
Recuperação de LDG	Aciaria	0,55	108,36	5,42
Redução das perdas de calor	Sinterização	0,09	6,89	0,34
Sistemas de monitoramento	Laminação	0,21	23,63	1,18
Uso de resíduos	Sinterização	0,18	0,88	0,04

Fonte: elaboração própria com base em EPE, (2018a); HASANBEIGI et al., (2013a); PINTO; SZKLO; RATHMANN, (2018a); WORRELL et al. (2010)

Outras medidas de eficiência energética que já estão disponíveis são as rotas de BF-BOF com carvão vegetal e forno a arco elétrico. Estas tecnologias são baseadas em combustíveis renováveis, o que reduzir consideravelmente as emissões por tonelada de aço produzido quando comparadas com a rota de carvão mineral. No caso da tecnologia EAF, além da utilização de combustíveis não-fósseis, ainda há um consumo específico inferior à BF-BOF.

Ferro-gusa e aço: Oferta de sucata

A tecnologia EAF possui intensidade energética inferior a rota tradicional além de utilizar eletricidade como fonte de energia principal. Entretanto, um fator limitante para a utilização desta tecnologia é a disponibilidade de sucata, matéria prima principal. Comparado com os principais países produtores de aço, Brasil possui um dos menores percentuais de utilização de EAF na sua produção. Outro elemento que dificulta a expansão desta tecnologia é o fato de que a maior parte do aço produzido aqui é exportada, o que reduz o estoque de aço contido no país (HASANBEIGI; SPRINGER, 2019).

A fim de aprimorar o rigor desta modelagem para o setor de aço, a disponibilidade de sucata é estimada com base em de SOUZA & PACCA (2021) e MORFELDT et al. (2015)

$$Scrap_t = \sum_i^N [n \times \rho \times (1 - \gamma) \times P_{t-T}] \quad (1)$$

Onde Scrap é a disponibilidade sucata no ano t; n é o percentual de aço no grupo 'i'; T e ρ são a vida útil e a taxa de recuperação de cada grupo, γ são as perdas nos estoques obsoletos, que foram assumidas iguais a 10% e P é o consumo aparente de aço.

Ferro-gusa e aço: Oferta de biomassa

A estimativa da disponibilidade de biomassa é feita através de metodologia baseada em PIKETTY et al. (2009) e de SOUZA & PACCA (2021). O primeiro fornece a informação do potencial técnico de área disponível para florestas plantadas, igual a 673.000 km², que é estimado considerando a disponibilidade de terra subtraído de reservas legais. Outro fator importante que precisa ser considerado é a proximidade da floresta em relação aos sítios industriais. Sendo assim, neste trabalho apenas consideramos como disponível as áreas que se encontram nos mesmos estados onde há disponibilidade de minério de ferro: Pará e Minas Gerais (ANM, 2020). Assim, o potencial total se reduz para 79.000 km².

O carvão vegetal utilizado na siderurgia brasileira é majoritariamente feito a partir de eucalipto. Assim, foi considerada a produtividade de eucalipto (m³/km²) nos respectivos estados, o que totalizou uma quantidade de carvão vegetal de 256 m³. Para estimar o potencial energético da oferta de carvão vegetal, assumiu-se que a densidade da matéria seca

igual a 0,25 m³, *gravity yield* igual a 25% e o poder calorífico inferior de 6.450 kcal/kg. Desta forma, chegou-se ao potencial energético de 450 x 10⁶ GJ.

Outra premissa assumida relacionada com a oferta de carvão vegetal foi o limite máximo da penetração da tecnologia BF-BOF utilizando esta fonte. Optou-se por limitá-la uma vez que os altos-fornos a carvão vegetal apresentam menor produtividade, assim, a maior penetração desta tecnologia será igual a 16% em consonância com o valor utilizado pelo estudo de PINTO *et al* (2018).

Medidas inovadoras

Como estas tecnologias inovadoras ainda não se encontram em um alto nível de amadurecimento, o potencial de penetração foi definido como uma função sigmoide ou logística (HAMMOND; AKWE; WILLIAMS, 2011). Para estimar o formato da curva, foi considerado 100% de disponibilidade no último ano de análise, 80% no ano de 2045 e 0% no ano inicial. Com exceção para a fusão redutora, que apresenta previsão de entrada para uma planta industrial em 2025 e já possui uma planta piloto em funcionamento. Com estes parâmetros estabelecidos, foi feita uma regressão linear para encontrar os coeficientes da função logística.

A Tabela 7 apresenta informações referentes aos custos de investimento, de operação e manutenção e consumo específico das principais fontes de energia das medidas inovadoras consideradas neste trabalho: DR-NG, DR-H2, SR Tecnoled, BF-BOF com CCS.

Tabela 7 - Consumo específico de tecnologias inovadoras na produção de aço

Rota	DR-NG	DR-H2	SR Tecnoled	BF-BOF-CCS
Intensidade energética (GJ/t)				
Gás natural	16,9	-	-	3,6
Carvão	-	-	-	15,9
Eletricidade	0,9	13,1	0,3	1,2

Carvão vegetal	-	-	22	-
CAPEX (\$/t)	500	574	640	717
OPEX (\$/t. ano)	50	80	64	88

Fonte: elaboração própria com base em ARENS; WORRELL; SCHLEICH, (2012); EUROFER, (2013); OTTO et al., (2017); TECNORED (2021); VAN RUIJVEN et al. (2016); VOGL; OLSSON; NYKVIST (2021)

Modelagem matemática do setor

A Figura 10 resume a metodologia proposta para o setor de ferro-gusa e aço para a estimativa do consumo energético, emissões e custos de mitigação. Nas caixas cinzas destacam-se as principais etapas do método: (i) os inputs utilizados no modelo, (ii) a modelagem do setor de aço, (iii) a modelagem dos recursos naturais, i.e., sucata e biomassa; (iv) e a otimização do modelo que considera as restrições de nível de emissão, oferta de recursos, retornando à penetração das tecnologias, consumo energético e custo total.

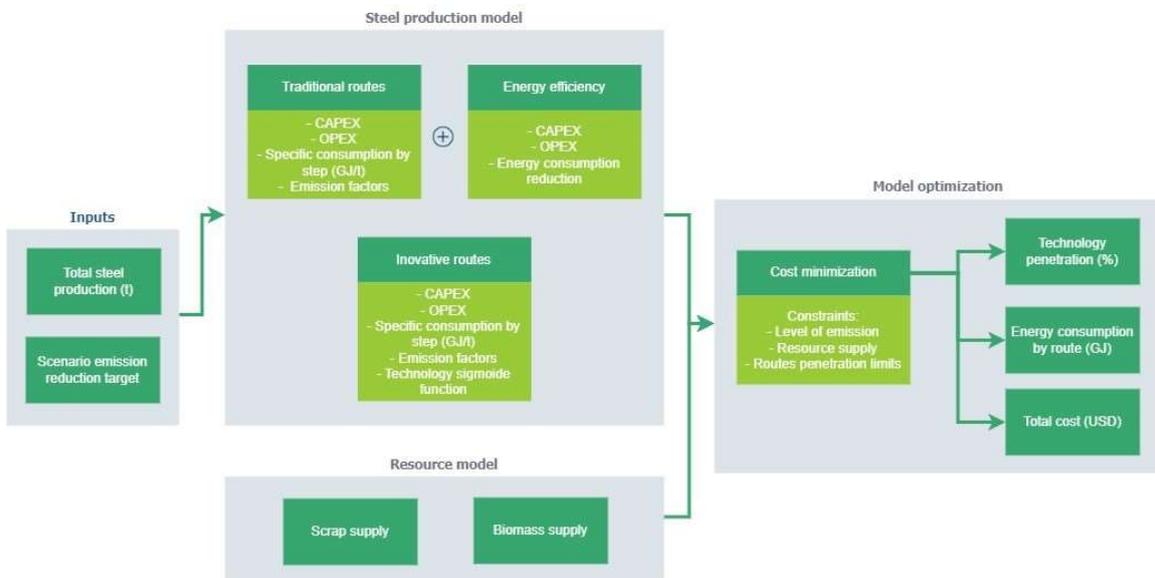


Figura 10 - Diagrama do módulo do setor de Ferro-gusa e Aço
Fonte: elaboração própria

A estimativa do consumo de energia é dividida em dois estágios. Inicialmente, temos o consumo de energia pelas tecnologias tradicionais, passível de redução mediante a aplicação

de opções específicas de mitigação de eficiência energética. O consumo de energia pelas rotas BF-BOF, EAF e produtores independentes é calculado multiplicando-se a produção total pelo percentual de produção de cada rota e pelo consumo específico de energia após a implementação de tecnologias de eficiência energética. O segundo estágio compreende a estimativa do consumo de energia por tecnologias inovadoras, a qual é calculada pelo produto entre a penetração da tecnologia, a produção total e seu consumo específico de energia.

$$CE_{year} = \sum_i \sum_n CEU_{n,i} (1 - \sum_j x_j) * P_{i,year} * y_i$$

Onde:

- CE é o consumo energético no ano;
- CEU é o consumo específico útil de energia da tecnologia i e o combustível n;
- P é a produção da tecnologia i no ano
- x é o ganho de eficiência da medida de eficiência energética das medidas de eficiência energética j
- y é o percentual das tecnologias que produzem aço i.

A emissão na indústria siderúrgica é determinada pelo produto entre o consumo específico de energia de cada combustível em cada rota tecnológica, a produção de aço de cada rota tecnológica e o fator de emissão de cada combustível, subtraindo o teor de carbono no aço. As Diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa fornecem informações sobre o fator de emissão (IPCC, 2006). Esses fatores foram mantidos constantes durante todos os períodos de análise. Além disso, consideramos a quantidade de teor de carbono no aço. Para isso, assumimos que 1% do carbono da produção é fixado no aço (MCTIC, 2020). A equação abaixo apresenta a estimativa de emissão.

$$TCE_{year} = \sum_i \sum_k CE_{n,i} * EF_n - CC * P_{i,year}$$

Onde:

- TCE_{year} representa a emissão total de carbono a cada ano;
- CEn,i é o consumo específico do combustível n na tecnologia i;
- P é a produção de aço proveniente da tecnologia i;
- EF é o fator de emissão;
- CC é o teor de carbono no aço.

Este modelo gera os resultados a partir de uma otimização que visa minimizar os custos de mitigação restrito ao nível de emissões e o limite de penetração das tecnologias de mitigação. Os custos de mitigação são definidos pela soma dos custos de investimento anualizados, custos de operação e manutenção, e os gastos de combustível. A otimização é definida, matematicamente.

$$\text{minimize } \sum_i total_capex_i + total_opex_i + fuel_cost_i$$

$$total_capex_i = (capex_i \cdot P_{year} \cdot x_{i,year}) \cdot r \cdot \frac{(1+r)^t}{(1+r)^t - 1}$$

$$total_opex_i = opex_i \cdot P_{year} \cdot x_{i,year}$$

$$fuel_cost_i = fuel_consumption_{i,n} \cdot Fuel_price_n$$

Subject to:

$$penetration_i \leq penetration\ limit$$

$$raw\ materials_i \leq raw\ materials\ limit$$

$$TCE = emission\ reduction$$

Onde:

- CAPEX é o custo de investimento da opção de mitigação ou tecnologia em \$/t;
- P_{year} é a produção de aço em um determinado ano;
- x_{i,year} é a penetração de uma determinada tecnologia;
- r é a taxa de desconto, igual a 8%;

- t é a vida útil da tecnologia, igual a 25 anos;
- $opex$ é o custo de operação e manutenção da tecnologia;
- $fuel\ cost$ é o aumento de custo ou economia gerada pelo custo de mitigação;
- $fuel_consumption$ é a quantidade de energia consumida por cada tecnologia;
- $Fuel_price$ é o preço de uma determinada fonte de energia;
- n é a fonte de energia;
- $raw\ materials$ são as matérias primas (carvão vegetal e sucata).

Os preços da energia foram fornecidos pelo Balanço Energético Nacional (EPE, 2023a) e PINTO et al. (2018) (Tabela 8). Como o foco desta tese é no setor industrial, não foi aplicada nenhuma variação sobre os preços dos combustíveis ao longo do período estudado. Entretanto, é importante destacar que a pressão por descarbonização afeta todos os setores da economia, em especial o de combustíveis fósseis. Entretanto, as incertezas sobre o comportamento do preço dos combustíveis exigem um olhar dedicado a elas, que, devido ao escopo definido por este trabalho, não será avaliado neste momento.

Tabela 8 - Preço de fontes de energia

Fonte	Preço (\$)⁵	Unidade
Óleo diesel	1273	m³
Óleo combustível	834	t
Gasolina	1183	m³
Álcool	857	m³
GLP	1635	t
Gás natural combustível	768	10³m³
Eletricidade industrial	150	MWh
Carvão vapor	63	m³
Carvão vegetal	81	bep

Fonte: elaboração própria com base em EPE (2021) e PINTO et al. (2018)

⁵ Valor do dólar considerado pela EPE (2023) é de R\$ 5,17

5.1.2. Química

A indústria química é caracterizada por um conjunto de produtos. Nesta tese foram selecionados aqueles mais relevantes para o consumo energético e emissões a fim de descrever o comportamento do setor. Em linhas gerais, estes produtos podem ser agregados em Petroquímicos básicos, soda-cloro, intermediários de fertilizante, polímeros e intermediários de polímeros.

O consumo energético foi calculado considerando tais produtos. O consumo específico, térmico e elétrico, dos principais produtos foi obtido de MCTIC, ONU MEIO AMBIENTE (2017d) (Tabela 9). A produção de cada um dos itens listados foi obtida através da Pesquisa Industrial Anual (IBGE, 2022a). Assim, o consumo energético é o produto entre o consumo específico e o nível de atividade de cada um dos itens. A diferença entre os valores encontrados pelas estimativas e o BEN foram atribuídas a outros produtos da indústria química.

Em relação às emissões do setor, estas podem ser divididas em duas. A primeira, relativa ao consumo energético, é calculada através do produto entre a quantidade energia consumida de um respectivo combustível e seu fator de emissão. A estimativa do consumo de energia foi feita com base no consumo térmico e elétrico específico de cada um dos principais produtos da indústria química.

Tabela 9 - Consumo Específico de produtos da indústria química

Produto	Subgrupo	Intensidade térmica (GJ/t)	Intensidade elétrica (GJ/t)
Cloro	Sódio-cloro	3,44	15,78
Ácido fosfórico	Fertilizante	4,8	1,68
Ácido nítrico	Fertilizante	0,54	0,01
Ácido sulfúrico	Fertilizante	0,607	0,071
Amônia	Fertilizante	13,98	1,47

Fosfato de amônio	Fertilizante	0,546	0,185
Nitrato de amônio	Fertilizante	0,373	0,133
Sulfato de amônia	Fertilizante	7,637	1,419
Uréia	Fertilizante	2,294	0,218
Etileno	Petroquímica	28,14	0,502
Propeno	Petroquímica	28,14	0,502
Butadieno	Petroquímica	13,01	0
BTX	Petroquímica	2,73	0,19
Estireno	Petroquímica	8,8	0
Ácido tereftálico	Petroquímica	2,7	1,44
Dicloroetano	Petroquímica	4,42	0
Cloreto de vinil	Petroquímica	5,79	0,79
Formaldeído	Petroquímica	4,11	0
Metanol	OPO	10,01	2,65
Óxido de etileno	OPO	2,09	0,84
Etilenoglicol	OPO	2,61	0,88
SBR	Polímero	8,08	0,86
Polietileno	Polímero	0,38	1,1
Polipropileno	Polímero	0,75	0,44
PVC	Polímero	2,05	0,6
PET	Polímero	23,07	2,38
Poliestireno	Polímero	0,5	0,2

Fonte: elaboração própria com base em MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE (2017b)

Para as emissões de processo, foi utilizado metodologia do quarto inventário. Os processos da indústria química que emitem gases de efeito estufa estão ligados aos produtos listados na Tabela 10, sendo os principais responsáveis pelas emissões do setor a produção de Amônia com fator de emissão de 1,46 tCO_{2e}/t de produto e a produção de Etileno com um fator de emissão de 1,8 tCO_{2e}/t de produto. O Quarto inventário nacional fornece os fatores de emissão por tonelada produzida (MCTIC, 2020).

Amônia é produzida com base em uma fonte de hidrogênio e de nitrogênio. A quantidade de emissões é relativa à matéria prima utilizada na sua fabricação. Quando utilizada nafta, 2,0 tCO₂ são emitidos por t de amônia produzida; 1,3 t CO₂ para gás de refinaria e 1,2 t CO₂ quando o gás natural é a matéria prima.

Tabela 10 - Fator de emissão dos produtos da indústria química

Produto	Fator de emissão (tCO_{2e}/t)
Amônia	1,46
ácido nítrico	0,58
Ácido adípico	0,41
Metanol	0,33
Etileno	1,83
Dicloroetano	0,29
Cloreto de vinil	0,29
Óxido de etileno	0,23
Coque de petróleo calcinado	0,014
negro de fumo	2,65
Ácido fosfórico	0,0002

Fonte: elaboração própria com base em MCTIC (2020)

Para estimar a quantidade de GEE emitida, foram utilizados os mesmos fatores de emissão apresentados no quarto inventário e multiplicados pela produção de cada um dos produtos.

Medidas de mitigação da indústria química

Foram consideradas medidas de mitigação visando a redução de emissões tanto do consumo energético quanto dos processos. Em linhas gerais, foram selecionadas medidas de eficiência energética, substituição de combustíveis e mudança em processos.

De acordo com o Quarto Inventário Nacional, existem 11 produtos responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa dentro da indústria química. Dentre eles, a produção de amônia e de etileno são responsáveis por mais de 80% das emissões do setor. As medidas de mitigação consideradas se restringem aos dois produtos que respondem por 80% das emissões: amônia e etileno. As medidas de eficiência energética são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Medidas de eficiência energética consideradas para a indústria química

Medidas de mitigação	Processo	CAPEX (\$/GJ)	Economia de energia (%)	Penetração limite (%)
Adoção de queimadores low nox	Todos	0,2	0,02	0,5
Monitoramento e manutenção de caldeiras	Todos	2,3	0,1	1
Recuperação de calor em caldeiras	Todos	3,4	0,013	1
Reciclo de condensado	Todos	9,3	0,1	0,1
Recuperação de hidrogênio na produção de amônia	Amônia	22,7	0,08	0,5
Recuperação de hidrogênio na produção de metanol	Metanol	5,7	0,04	0,5

Integração de processos com análise pinch	Todos	26,6	0,03	0,5
Adoção de pré-reformador na produção de amônia	Amônia	8,5	0,04	0,5
Adoção de pré-reformador na produção de metanol	Metanol	7,5	0,04	0,5

Fonte: elaboração própria com base em MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE (2017b)

Como parte das emissões do setor é oriunda das reações, a mudança por processos menos intensivos em carbono é uma possibilidade e necessidade de mitigação. A produção de Eteno e Amônia somam 80% das emissões do processo. Além disso, há muitas incertezas ligadas a novas rotas tecnológicas e são poucas as informações sobre elas. Sendo assim, será considerado que apenas as tecnologias de mitigação referente a estes dois produtos.

No modelo, as tecnologias para produção de amônia e etileno foram selecionadas com base na revisão da literatura sobre as tecnologias do setor químico. Em linhas gerais, aquelas que mais se destacam para produção de amônia são as rotas a partir do hidrogênio renovável e da gaseificação da biomassa (IEA, 2020d). A primeira rota tecnológica apresenta fator de emissão quinze vezes inferior (0,12 tCO₂/t amônia) a produção tradicional a partir de fontes fósseis (IEA, 2018c). A outra rota de produção de amônia, a partir da gaseificação da biomassa, apresenta um fator de emissão ligeiramente superior à da produção com hidrogênio proveniente de eletrólise, 0,67 tCO₂/t amônia (GILBERT et al., 2014).

Para produção de bioetileno, considerou-se o fator de emissão de 0,2 tCO₂e/t etileno (IEA, 2018c). Entretanto, é importante destacar que seja possível que as emissões atribuídas a esta rota de produção possam chegar a valores nulos ou até mesmo negativos por causa do armazenamento de carbono biogênico na vida útil do produto (OLIVEIRA et al., 2020b).

Considerando que estas tecnologias são processos ainda não amadurecidos, é importante traçar uma curva que limitará a penetração destas tecnologias, de forma análoga ao que foi feito com as tecnologias inovadoras no setor siderúrgico (HAMMOND; AKWE; WILLIAMS, 2011). Sendo assim, a curva de penetração definida em um formato de sigmoide foi estimada considerando a penetração limite de 50% no ano de 2035 e 100% no último da

análise (2050). Com estes parâmetros estabelecidos, foi feita uma regressão linear para encontrar os coeficientes da função logística.

Modelagem matemática da indústria Química

A primeira fase da modelagem da indústria química se dá pelo cálculo do consumo de energia do setor. Este parâmetro é calculado a partir do consumo específico de cada um dos produtos listados na Tabela 9, os ganhos de eficiência energética das medidas de mitigação listadas pela Tabela 11 e a nível da produção de cada um. O consumo energético por combustível é calculado a partir do produto entre o consumo de energia total, a matriz energética no ano base (2020), adicionado os ganhos ou perdas no percentual do combustível fruto da substituição dos fósseis pelos renováveis. Esta estrutura é apresentada pela Equação 1:

$$CE_{year,n} = \sum_i CEU_{n,i} (1 - \sum_j x_j) * (Share_n + w_n) * P_{i,year} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

- CE é o consumo energético no ano;
- CEU é o consumo específico útil do produto i e o combustível n;
- P é a produção do produto i no ano
- Share é o percentual do combustível dentro da matriz energética do setor;
- x é o ganho de eficiência da medida de eficiência energética das medidas de eficiência energética j;
- w é o percentual que corresponde a substituição do combustível fóssil por algum renovável

A etapa seguinte da modelagem aborda o cálculo das emissões de energia e de processo (Equação 2). Em relação à primeira fonte de emissão, este valor é obtido através do produto entre o consumo de energia associado a cada combustível pelo seu respectivo fator de emissão. Já as emissões de processo são resultado da multiplicação do fator de emissão

dos processos industriais, a quantidade produzida e o percentual da rota tecnologia que corresponde à produção.

$$TCE_energia_{year} = \sum_i \sum_k CE_{n,i} \times EF_n \quad \text{Equação 2}$$

$$TCE_processo_{year} = \sum_i EF_{p_i} \times P_{i,year} \times y_j$$

Onde:

- TCE_energia é o total de emissões proveniente das fontes de energia;
- CE é o consumo energético do combustível n referente ao produto i;
- EF é o fator de emissão da fonte de energia n;
- TCE_processo corresponde às emissões totais de processo no ano;
- EF_p é o fator de emissão de cada um dos produtos da indústria química;
- P é a quantidade produzida de cada produto i
- y_j é o percentual de produção de cada rota tecnológica j

Por fim, o modelo busca encontrar os parâmetros da penetração das medidas de eficiência energética, substituição de combustíveis e novas rotas tecnológicas visando minimizar os custos de produção. As restrições da modelagem da indústria química estão ligadas ao limite de emissões estabelecidos pelas premissas dos cenários e o limite de penetração das tecnologias de eficiência energética e de rotas tecnológicas de produção.

$$\text{minimize } \sum_i total_capex_i + total_opex_i + fuel_cost_i \quad \text{Equação 3}$$

$$total_capex_i = (capex_i \cdot P_{year} \cdot x_{i,year}) \cdot r \cdot \frac{(1+r)^t}{(1+r)^t - 1}$$

$$total_opex_i = opex_i \cdot P_{year} \cdot x_{i,year}$$

$$fuel_cost_i = fuel_consumption_{i,n} \cdot Fuel_price_n$$

Subject to:

$$penetration_i \leq penetration_limit$$

$$TCE = \text{emission reduction}$$

Onde:

- CAPEX é o custo de investimento da opção de mitigação ou tecnologia em \$/t;
- P_{year} é a produção de aço em um determinado ano;
- $x_{i,\text{year}}$ é a penetração de uma determinada tecnologia;
- r é a taxa de desconto, igual a 8%;
- t é a vida útil da tecnologia, igual a 25 anos;
- opex é o custo de operação e manutenção da tecnologia;
- *fuel cost* é o aumento de custo ou economia gerada pelo custo de mitigação;
- *fuel_consumption* é a quantidade de energia consumida por cada tecnologia;
- *Fuel_price* é o preço de uma determinada fonte de energia;
- n é a fonte de energia;
- TCE é o total das emissões de gases de efeito estufa.

A Figura 11 apresenta, de forma resumida, o modelo desenvolvido por esta tese para o segmento industrial da indústria química. Indicando, no primeiro bloco, o conjunto de *inputs* que irão servir para estimar o consumo de energia e emissões, a partir de premissas exógenas. Em seguida, o módulo para calcular as emissões totais, separadas em emissões de energia e processo, bem como as medidas de mitigação. Por fim, é feita a otimização do modelo para encontrar os parâmetros como a penetração das tecnologias e o custo de mitigação.

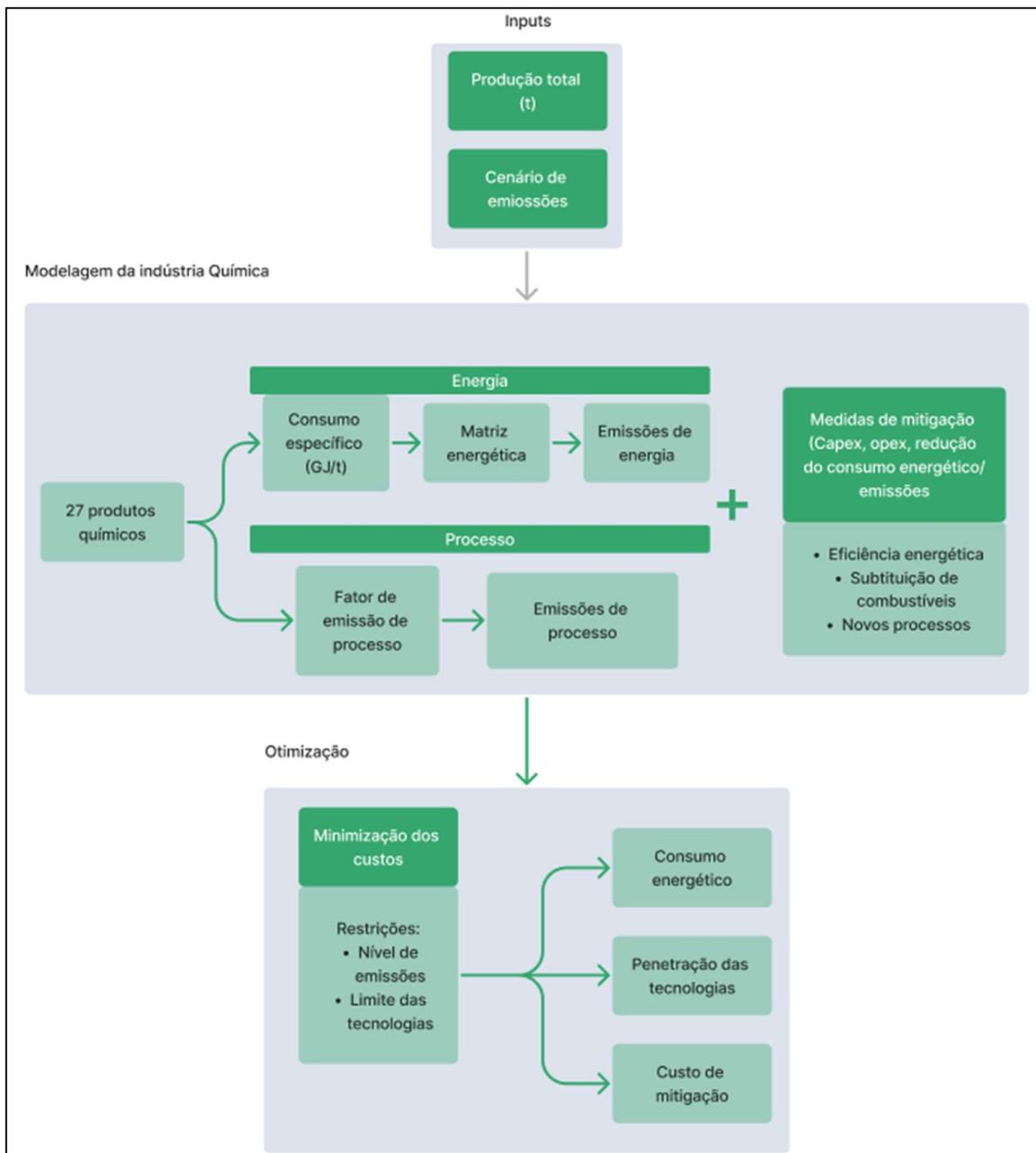


Figura 11 - Diagrama da modelagem energética e de emissões da indústria química
 Fonte: elaboração própria.

5.1.3. Cimento

As emissões de gases de efeito estufa na produção de cimento pode ocorrer tanto pela queima de combustíveis fósseis para geração de energia como durante o processo de calcinação. A modelagem deste setor foi feita considerando as principais etapas da produção

de cimento: (i) preparação das matérias primas, (ii) produção de clínquer; (iii) moagem do cimento.

Para estimar o consumo energético em cada uma das etapas foi utilizado o Balanço de Energia Útil fornecido pela EPE. Com exceção de óleo diesel e eletricidade, todas as fontes de energia são majoritariamente utilizadas em Calor de processo e Aquecimento direto (Tabela 12), que no caso da produção de cimento se refere a etapa da produção do clínquer. As duas primeiras fontes são referentes ao uso em força motriz, sendo assim, ligadas a etapas de preparação da matéria prima e moagem do cimento.

Tabela 12 - Coeficiente de destinação por combustível da indústria cimenteira

Combustível	Força motriz	Calor de processo	Aquecimento direto	Outras
Gás natural	0%	0%	100%	0%
Outras não especificadas	0%	0%	100%	0%
Carvão metalúrgico	0%	0%	100%	0%
Óleo diesel	100%	0%	0%	0%
Óleo combustível	0%	16%	84%	0%
GLP	0%	0%	100%	0%
Coque de carvão Mineral	0%	0%	100%	0%
Eletricidade	98%	0%	0%	2%
carvão vegetal	0%	0%	100%	0%
Lenha	0%	0%	100%	0%
Outras fontes secundarias de petróleo	0%	0%	100%	0%

Fonte: elaboração própria com base em EPE (2018c)

O consumo energético dos combustíveis utilizados em calor de processo e aquecimento foram alocados na etapa da fabricação de clínquer. Já os demais, foram alocados nas etapas relativas à preparação da matéria prima.

Com base no consumo de energia em cada uma destas etapas e no nível de produção de clínquer, chegou-se ao consumo específico por combustível para fabricação de clínquer, em GJ/ t de clínquer. Este indicador é o vetor do consumo de energia que será utilizado para estimativa do consumo energético futuro. Desta forma, o consumo energético é descrito pela Equação 4 em um determinado ano é:

$$\text{Consumo energético (GJ)} = \sum_i CEs_{p_{t\acute{e}rmico},i} \times Prod_{cl\acute{i}nquer} + \sum_i CEs_{p_{for\acute{c}a\ motriz},i} \times Prod_{cimento}$$

Equação 4

Sendo $CEs_{p_{t\acute{e}rmico}}$ o consumo específico térmico, $Prod$ a produção, e i o combustível.

O cálculo das emissões foi segregado em duas partes. A primeira, referente ao consumo de energia, possui a mesma metodologia dos demais segmentos, onde o consumo energético é multiplicado pelo fator de emissão de cada combustível. Para as emissões de processo, foi utilizado um fator de emissão de acordo com as informações disponíveis no Quarto Inventário de Emissões. A Equação 5 descreve o cálculo das emissões para o setor de cimento.

$$\text{Emissões} = \sum_i CEn_{t\acute{e}rmico,i} \times FE_i + Raz\tilde{a}o\ Cl\acute{i}nquer \times Prod_{cl\acute{i}nquer}$$

Equação 5

Medidas de mitigação cimento

Em relação as medidas de mitigação foram escolhidas quatro tipos de medidas: Eficiência energética, Substituição de coque por combustíveis alternativos, substituição de clínquer e CCS.

A escolha das medidas de mitigação para o setor de cimento foi feita com base nos estudos de DE OLIVEIRA (2017); HASANBEIGI et al. (2013b); WORRELL; KERMELI; GALITSKY (2013). A Tabela 3 apresenta os parâmetros destas principais tecnologias como

a economia de combustível e eletricidade, seus custos de investimento e operação, bem como o limite de penetração adotado para inserção destas tecnologias.

Foram selecionadas tecnologias de eficiência energética, utilização de combustíveis alternativos e captura de carbono. As tecnologias de eficiência energética selecionadas são todas aquelas apresentadas pelos estudos de HASANBEIGI et al. (2013a); HASANBEIGI; MENKE; PRICE (2010); MORROW et al. (2014); XU; YI; FAN (2016); ZUBERI; PATEL (2017), que já estão disponíveis no mercado. A utilização de combustíveis alternativos, prática já utilizada pelo setor, é uma das medidas que podem ser ampliadas, considerando um limite técnico conservador de 80%. Já a captura de carbono, foram utilizados os valores estimados XU et al. (2016) e ROCHEDO et al. (2016).

Tabela 13 - Medidas de mitigação aplicáveis ao setor de cimento

Medida	Etapa	Economia elétrica (MJ/t clínquer)	Economia energia (MJ/t clínquer)	CAPEX (\$/t)	OPEX (\$/t)
<i>Adjustable speed drive</i>	Produção de clínquer	18	60	0,23	0
<i>Blended cement</i>	Moagem de cimento	0	0	10,5	3
<i>Conversion to reciprocating grate cooler</i>	Produção de clínquer	0	220	10	0
<i>Energy management and process control</i>	Produção de clínquer	9,3	140	0,9	0
<i>Fuel switching</i>	Combustíveis	-3	300	5	0,5
<i>Improved refractories for clinker making</i>	Produção de clínquer	0	350	0,6	0
<i>Indirect firing for clinker making</i>	Produção de clínquer	0	120	8	0

<i>Kiln combustion system improvements</i>	Produção de clínquer	0	200	1	0
<i>Optimized heat recovery upgraded clinker cooler</i>	Produção de clínquer	0	80	0,2	0
<i>Replacing vertical shifts with suspension preheater</i>	Produção de clínquer	0	2400	35	0
CCS	Produção de clínquer	-	-	114	14

Fonte: elaboração própria com base em HASANBEIGI et al. (2013a); HASANBEIGI; MENKE; PRICE (2010); MORROW et al. (2014); XU; YI; FAN (2016); ZUBERI; PATEL (2017)

Modelagem do setor de Cimento

O cálculo do consumo energético, variável que definirá tanto os custos de energia quanto os níveis de emissão, é dado pelo produto entre o consumo específico, após aplicada medida de mitigação e a produção.

$$CE = \sum_i (CE_{\text{Esp}_{\text{térmico},i}} - \sum_i \text{Eficiência}_i \times x_i) \times \text{Prod} \times \left(\frac{R_{\text{clínquer}}}{\text{cimento}} - y \right) + \sum_i (CE_{\text{Esp}_{\text{força motriz},i}} \sum_i \text{Eficiência}_i \times x_i) \times \text{Prod}_{\text{cimento}}$$

Equação 6

Onde:

- CE é o consumo energético total;
- $CE_{\text{Esp}_{\text{térmico}}}$ o consumo específico térmico;
- $CE_{\text{Esp}_{\text{força motriz}}}$ o consumo específico das etapas da preparação da matéria prima e moagem do cimento;
- Prod a produção, e i o combustível;
- y é a proporção de adições ao clínquer;
- e x a penetração das medidas de eficiência energética

As emissões da indústria de cimento são calculadas considerando suas duas principais fontes: energia e processo. As emissões de energia são resultado do consumo específico, os ganhos de eficiência, substituições de combustíveis e a produção de clínquer e cimento. Já as emissões de processo são estimadas a partir da produção de clínquer, as medidas de mitigação como as adições ao clínquer e captura de carbono.

$$TCE = \sum_i CE_i \times FE_i + \left(\frac{R_{clínquer}}{cimento} - y \right) \times Prod$$

Equação 7

Onde:

- CE é o consumo energético total;
- FE é o fator de emissão do combustível i;
- $R_{clínquer/cimento}$ é a razão clínquer/cimento no ano base
- Prod a produção, e i o combustível;
- y é a proporção de adições ao clínquer;

Por fim, a função objetivo do modelo visa minimizar os custos de mitigação, sujeito a um conjunto de restrições, dentre elas, um nível de emissão estabelecido. As variáveis que ditam o comportamento da mitigação, chamadas de x , indicam a penetração das tecnologias listadas.

O custo de mitigação, é descrito pelo custo de investimento (Capex), custo de operação e manutenção (Opex) e o custo dos combustíveis.

$$\text{minimize } \sum_i total_capex_i + total_opex_i + fuel_cost_i$$

Equação 8

$$total_capex_i = (capex_i \times P_{year} \times x_{i,year}) \cdot r \cdot \frac{(1+r)^t}{(1+r)^t - 1}$$

$$total_opex_i = opex_i \times P_{year} \times x_{i,year}$$

$$fuel_cost_f = fuel_consumption_f \times Fuel_price_f$$

Subject to:

$penetration_i \leq penetration\ limit$

$penetration_i \leq efficiency\ limit$

$emission = emission\ reduction$

Onde:

- CAPEX é o custo de investimento da opção de mitigação ou tecnologia em \$/t;
- P_{year} é a produção de aço em um determinado ano;
- $X_{i,year}$ é a penetração de uma determinada tecnologia;
- r é a taxa de desconto, igual a 8%;
- t é a vida útil da tecnologia, igual a 25 anos;
- opex é o custo de operação e manutenção da tecnologia;
- *fuel cost* é o aumento de custo ou economia gerada pelo custo de mitigação;
- *fuel_consumption* é a quantidade de energia consumida por cada tecnologia;
- *Fuel_price* é o preço de uma determinada fonte de energia;
- n é a fonte de energia;

A Figura 12 apresenta de forma resumida as principais etapas da modelagem. Primeiramente, os *inputs* são definidos a partir de premissas adequadas aos cenários a serem estudados, como a produção total do setor e o limite de emissão. Em seguida, são feitos os cálculos do consumo de energia, suas emissões bem como as emissões de processo, aplicadas as devidas de medidas de mitigação. Por fim, a penetração destas tecnologias e seus custos é feito através do módulo de otimização que visa minimizar os custos de mitigação.

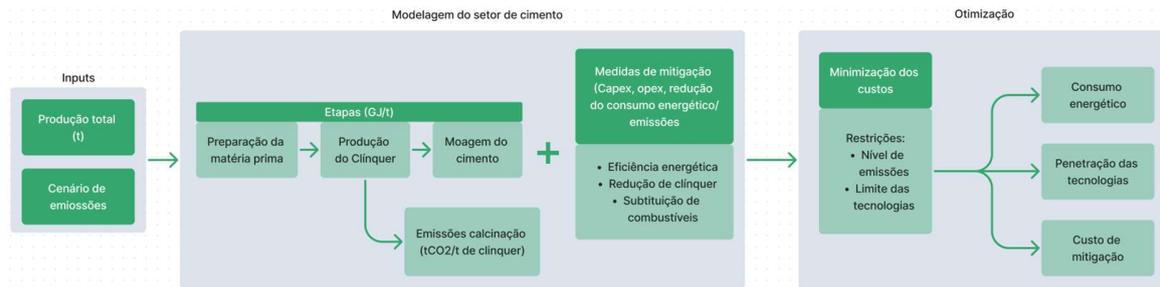


Figura 12 - Esquema da modelagem do setor de cimento.

Fonte: elaboração própria

5.1.4. Metodologia para os demais segmentos

Para os demais segmentos industriais (Alimentos e bebidas, Papel e celulose, Cerâmica, Não-Ferrosos, Ferroligas, Têxtil, Mineração e Outras indústrias) optou-se por utilizar a mesma metodologia devido duas causas principais: (i) a menor relevância em termos das emissões frente aos três anteriores e (ii) a heterogeneidade de processos e produtos.

Como fora mencionado, os três principais segmentos em termos de emissão de gases de efeito estufa da indústria brasileira são o (i) ferro-gusa e aço, (ii) cimento, (iii) química, que representam mais de 50% das emissões deste setor, sendo os oito segmentos restantes responsável pela outra metade das emissões. Em relação à heterogeneidade de processos, como visto previamente na descrição da indústria, cada um dos demais segmentos industriais podem ter diversos produtos e processos. Um exemplo é a indústria de alimentos, que é composta por dezenas de produtos, onde cada um desses produtos possui um diferente processo de produção.

A Figura 13 apresenta um fluxograma resumido da metodologia utilizada para fazer o cálculo do consumo de energia, emissões e custos dos demais segmentos industriais. Assim como nos outros módulos, os *inputs* do modelo são o nível de atividade e o custo de energia. O perfil dos segmentos é dado pelo Balanço de Energia Útil (BEU), que indicará os serviços energéticos demandados por cada setor, bem como a eficiência deles. A segunda parte do modelo se refere a mitigação, onde são aplicadas medidas de eficiência energética e substituição de combustíveis. Por fim, o modelo apresenta uma etapa de otimização, análoga

aos outros segmentos industriais, para estimar os custos de mitigação, o mix de tecnologias que serão inseridas para atingir os compromissos climáticos e o consumo energético.

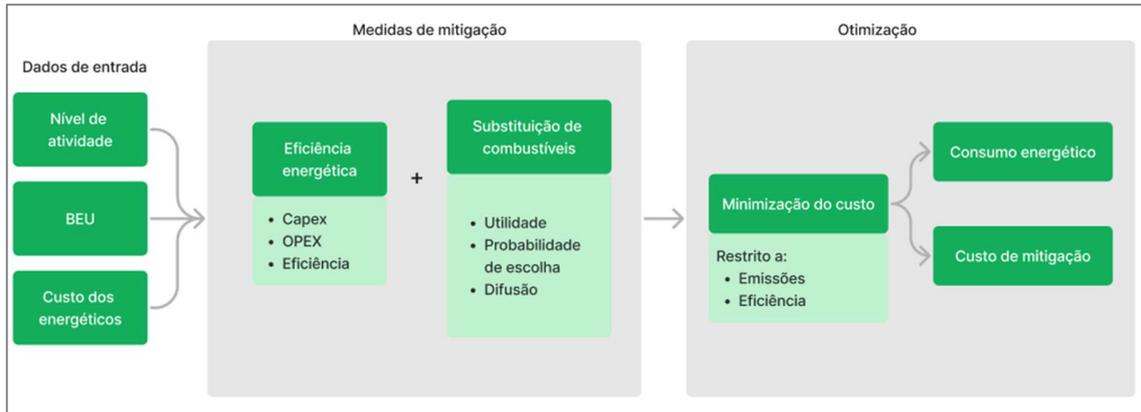


Figura 13 - Diagrama do módulo de emissões dos demais segmentos industriais

Fonte: elaboração própria

Desta forma, a modelagem destes segmentos industriais foi feita tendo em base o Balanço de Energia Útil (BEU) (EPE, 2009). Este método consiste em uma análise referente ao consumo de energia, fornecidas pelo Balanço Energético Nacional, onde pode-se correlacionar a energia consumida por usos finais específicos: força motriz, calor de processo, aquecimento direto, refrigeração, iluminação, eletroquímica e outros. A energia que chega em cada um destes equipamentos é chamada de energia final. Após a conversão feita no equipamento, através de sua eficiência, é estimada a energia útil, que consiste no serviço energético desejado em si. Em outras palavras, a energia final é igual a energia útil mais as perdas na conversão (PAOLI; LUPTON; CULLEN, 2018). A Figura 14 apresenta de forma esquematizada o balanço de energia útil.

Uma das vantagens de caracterizar os segmentos através do BEU, é a possibilidade de indexar cada medida de mitigação ao serviço energético específico. Em outras palavras, é possível entender o potencial de redução das emissões a partir da melhoria de eficiência em caldeiras (equipamentos utilizados em calor de processo), bem como ter uma visão mais realista do potencial de eficiência energética disponível para cada setor. Além disso, com os dados a respeito da eficiência de cada combustível, pode-se ter uma visão mais detalhada sobre a substituição de uma fonte de energia fóssil por renovável.

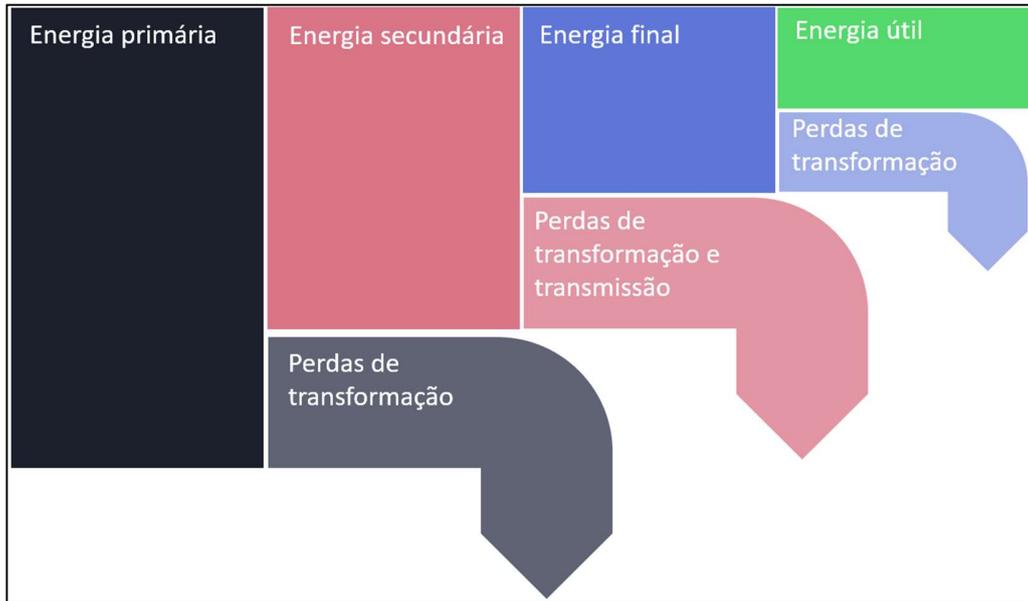


Figura 14 - Esquema do balanço de energia útil
 Fonte: elaboração própria com base em (EPE, 2009)

A EPE publicou um estudo que fornece informações sobre o balanço de energia útil dos segmentos industriais brasileiros (EPE, 2009, 2018c). Ela foi estimada com base nas eficiências médias das instalações das indústrias analisadas. Através do produto do consumo de energia final de cada segmento e o Coeficiente de destinação, é definido o consumo de energia em cada um destes serviços. A energia útil consumida é obtida pelo produto entre o consumo energético em cada uma das etapas pela eficiência energética.

No estudo publicado pela EPE são apresentados os Balanços de energia útil destes segmentos. Além das matrizes de coeficiente de destinação e eficiência, o estudo também elaborou o potencial de eficiência para os setores.

A primeira etapa consiste em estimar a quantidade de energia final em cada um dos serviços energéticos, através do produto entre o coeficiente de destinação e o consumo de energia final, fornecido pelos BEU e BEN, respectivamente.

$$CF_{ij} = CD_{ij} \times EF_i \quad \text{Equação 9}$$

Onde CF_{ij} é o consumo final do combustível i na etapa j ; CD é representa o coeficiente de destinação do combustível em cada etapa; e EF é o consumo de energia do combustível j .

Para exemplificar, a Tabela 14 apresenta os valores dos coeficientes de destinação do setor de Alimentos e Bebidas.

Tabela 14 - Coeficientes de Destinação para o Setor de Alimentos e Bebidas

Fontes	Força motriz	Calor de processo	Aquecimento direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás natural	0%	87%	13%	0%	0%	0%	0%
Carvão mineral	0%	74%	26%	0%	0%	0%	0%
Carvão metalúrgico	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Lenha	0%	79%	21%	0%	0%	0%	0%
Bagaço de cana	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%
Outras fontes	0%	50%	50%	0%	0%	0%	0%
Óleo diesel	95%	2%	3%	0%	0%	0%	0%
Óleo combustível	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%
Gasolina	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
GLP	28%	18%	54%	0%	0%	0%	0%
Querosene	0%	45%	55%	0%	0%	0%	0%
Gás	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Coque de carvão mineral	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Eletricidade	74%	0%	0%	21%	5%	0%	0%
Carvão vegetal	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Álcool etílico	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Outras fontes secundarias	0%	50%	50%	0%	0%	0%	0%
Alcatrão	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Fonte: elaboração própria com base em EPE (2018d)

Em seguida, calcula-se o consumo de energia útil através do produto do consumo final por etapa e a eficiência de cada uma das etapas, em outras palavras, a demanda de energia útil por nível de atividade do segmento industrial.

$$EU_{ij} = CF_{ij} \times EF_{ij} \quad \text{Equação 10}$$

Onde EU_{ij} é a energia útil específica do combustível i no setor j ; CF é o consumo final do combustível i , setor j ; EF é o coeficiente de eficiência do combustível i , setor j . A Tabela 15 apresenta os coeficientes de eficiência para o setor de alimentos e bebidas.

Tabela 15 Coeficiente de eficiência por combustível da indústria de alimentos e bebidas

Fontes	Força motriz	Calor de processo	Aquecimento direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica
Gás natural	0%	84%	50%	0%	0%	0%
Carvão mineral	0%	77%	52%	0%	0%	0%
Carvão metalúrgico	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Lenha	0%	80%	52%	0%	0%	0%
Bagaço de cana	0%	80%	0%	0%	0%	0%
Outras fontes	0%	77%	52%	0%	0%	0%
Óleo diesel	44%	88%	52%	0%	0%	0%
Óleo combustível	0%	85%	0%	0%	0%	0%
Gasolina	0%	0%	0%	0%	0%	0%

GLP	28%	85%	52%	0%	0%	0%
Querosene	0%	88%	52%	0%	0%	0%
Gás	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Coque de carvão mineral	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Eletricidade	90%	0%	0%	77%	65%	0%
Carvão vegetal	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Álcool etílico	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Outras fontes secundarias	0%	77%	52%	0%	0%	0%
Alcatrão	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Fonte: elaboração própria com base em EPE (2018d)

Por fim, calculei o consumo útil específico através da razão entre o consumo útil e o nível de atividade do setor, representado matematicamente pela Equação 11:

$$CEU_i = \frac{EU}{NA} \quad \text{Equação 11}$$

Onde CEU é o consumo específico de energia útil; e NA é o nível de atividade do setor i. Com este indicador, é possível estimar o consumo de energia através do cálculo reverso, *i.e.*, através do produto entre o nível de atividade de cada setor em cada ano e o consumo específico de energia útil.

Medidas de mitigação

Em linhas gerais, as medidas de mitigação foram segregadas em dois grupos: eficiência energética e a substituição dos combustíveis fósseis. Este conjunto foi moldado para facilitar o entendimento do caminho de descarbonização.

As medidas de eficiência energética consideradas foram coletadas a partir de estudos nacionais e internacionais. Destaques ficam para o estudo elaborado pelo MCTIC & ONU

Meio Ambiente (2017c), intitulado Opções de Mitigação em Setores Chave, que apresenta e analisa a implementação de medidas de eficiência energética e tecnologias inovadoras nos setores da economia brasileira com detalhes para os onze segmentos industriais estudados nesta tese. Outro trabalho que merece ser pontuado é o projeto realizado pela EPE chamado “Análise de eficiência energética” (EPE, 2018c). O trabalho mapeou os principais segmentos industriais, em termos de consumo energético, seus consumos específicos, potencial de eficiência energética e as medidas que podem ser utilizadas para garantir a redução no consumo de energia.

Os demais segmentos industriais aqui agrupados possuem emissões majoritariamente ligadas ao consumo de energia. Desta forma, a seleção de tecnologias de mitigação foca nesta fonte de emissões. Em linhas gerais, foram compiladas medidas de eficiência energética com base na revisão da literatura apresentada anteriormente, com destaque para os estudos realizados por CENTRO CLIMA (2017); EPE (2018c); MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE (2017a). A Tabela 16 apresenta um resumo destas medidas de mitigação com seus potenciais de eficiência energética e custos.

Tabela 16 - Medidas de eficiência energética aplicadas para os demais segmentos industriais

Medida	Economia (%)	Capex	Opex	Unidade
Alimentos e bebidas				
Otimização do retorno do condensado	5%	850	9	\$/GJ
Manutenção periódica do purgador em caldeiras	10%	440	4	\$/GJ
Melhoria no isolamento de tubulações em caldeiras	8%	1,330	13	\$/GJ
Recuperação do calor a partir de gases de combustão em caldeiras a	10%	1,880	19	\$/GJ
Cerâmica				
Manutenção do forno	2%	120	6	\$/GJ

Manutenção do secador	4%	25	1	\$/GJ
Reaproveitamento de calor	12%	30	2	\$/GJ
Ferroligas				
Implementação de melhores técnicas de produção disponíveis	5%	52.8	2.6	\$/GJ
Sistema de monitoramento	1%	2.6	0.1	\$/GJ
Controle avançado	10%	0.1	9.2	\$/GJ
Sistema de utilidade eficientes	10%	0.1	6.6	\$/GJ
Trocadores de calor eficientes	10%	0.1	4.0	\$/GJ
Mineração				
Manutenção periódica da frota de veículos	3%	-	19	\$/GJ
Melhoria de motores, bombas e ventiladores	3%	120	9	\$/GJ
Melhoria de componentes auxiliares do forno	5%	120	9	\$/GJ
Não-ferrosos				
Uso de material isolante em fornos	4%	1	0	\$/t
Recuperação de calor	20%	10	1	\$/t
Otimização do fluxo de ar de combustão	18%	3		\$/t
Controle de pressão e vazamento em fornos	8%	2	0	\$/t
Troca de smelter Soderberg por Prebake	15%	2,600	260	\$/t
Outras indústrias				
Melhorias na combustão e processo	3%	78	4	\$/GJ

Melhoria no forno	12%	400	20	\$/GJ
Recuperação de calor	9%	200	10	\$/GJ
Redução da perda de calor	5%	167	8	\$/GJ
Papel e celulose				
Caldeiras auxiliares com controle avançado de processo	3%	0.6	0.1	\$/t
Caldeiras com recuperação de calor e vapor	1%	1.2	0.2	\$/t
Retorno de condensado	14%	5.6	0.8	\$/t
Manutenção de caldeiras	10%	-	0.1	\$/t
Modificações nos fornos	5%	3.7	-	\$/t
Secadores CondeBelt	15%	37.5	-	\$/t
Uso de prensas mais eficientes	15%	55.9	3.3	\$/t
Textil				
Recuperação de calor	5%	0.8	0.0	\$/GJ
Melhoria na combustão	6%	0.3	0.0	\$/GJ
Melhoria no isolamento	5%	0.1	0.0	\$/GJ
Retorno de condensado	4%	0.0	0.0	\$/GJ

Fonte: elaboração própria com base em CENTRO CLIMA, (2017); EPE, (2018e); HENRIQUES, (2010); KERMELI et al., (2014); MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE, (2017f)

Como as medidas de eficiência energética estão sujeitas a um limite técnico, também foi considerado a substituição de combustíveis. O consumo de combustíveis fósseis para geração de calor é uma das maiores fontes de emissões do setor industrial. Desta forma, há um grande potencial de mitigação ao utilizar outros tipos de fornos alimentados por fontes renováveis, como caldeiras a biomassa e caldeiras elétricas.

A geração de calor industrial pode ser feita através de uma vasta diversidade de combustíveis renováveis, a depender da temperatura necessária para operação. Energia solar pode fornecer energia suficiente para operações de temperatura entre 100 e 200°C, podendo chegar até 500°C com tecnologias mais inovadoras (THIEL; STARK, 2021). Biogás ou biometano também são tecnologias que podem ser utilizadas como forma de reduzir as emissões do uso de combustíveis. Entretanto, optou-se por considerar apenas fontes de energia tradicionalmente já utilizadas na geração de calor. Esse caminho foi escolhido pois as incertezas sobre as fontes tradicionais já são grandes, influenciadas pela dinâmica dos preços e a sua oferta. Tecnologias como solar e biogás ainda estão em desenvolvimento no país e suas incertezas transbordam os limites econômicos e esbarram em dúvidas técnicas e regulatórias. Sendo assim, no caso da substituição de combustíveis fósseis foram consideradas duas principais tecnologias no caso de aquecimento direto e calor de processo: caldeiras a biomassa e caldeiras elétricas.

Para a maior parte das indústrias, a escolha por um combustível para geração de calor não se dá apenas pelo seu preço, mas também por preferências de cada consumidor. A fim de melhor representar as possibilidades de substituição de combustíveis, foi utilizado a metodologia desenvolvida por FLEITER et al. (2018); REHFELDT et al. (2020); REHFELDT; FLEITER; WORRELL (2018) que se baseou em uma metodologia de utilidade aleatória com abordagem logit, inspirada pelos métodos de TRAIN (2009) e MCFADDEN (1973, 2000) porém com foco no setor industrial.

Os elementos considerados pelo modelo desenvolvido são: (i) o preço do energético; (ii) a homogeneidade dos segmentos; (iii) infraestrutura e preferências técnicas dos processos industriais, chamada de preferências.

$$U_{i,j} = \varepsilon_j \times \left[\alpha_{i,j} \times \left(\frac{(p_i - \bar{p})}{\bar{p}} \right) + \gamma_{i,j} \right] \quad \text{Equação 12}$$

Sendo:

ε_j a homogeneidade de mercado do setor j,

$\alpha_{i,j}$ a sensibilidade do preço da fonte de energia i no setor j

p_i o preço de energia da fonte i

\bar{p} a média simples do preço de todas as fontes de energia

$\gamma_{i,j}$ o custo intangível/benefício da fonte de energia no setor j

A diferença relativa de preços é um dos principais elementos para a mudança da utilização de um combustível (REHFELDT; FLEITER; WORRELL, 2018). Esta diferença pode ser representada como a razão entre a diferença de preços de uma fonte de energia e a média simples dos preços de todas as fontes de energia disponível. Em outras palavras, uma fonte de energia com um preço maior do que a média de todas as fontes indica menor utilidade, sendo considerado menos atrativo.

γ é utilizado para representar um elemento estrutural na escolha da fonte de energia não relacionado ao seu preço. Por exemplo, a infraestrutura existente na região de distribuição de energia como as opções de transporte (gasoduto, sistema rodoviário, marítimo, ferroviário), além de elementos ligados a especialidade técnica nas tecnologias específicas, contratos, requisitos técnicos e regulatórios.

O parâmetro " ϵ " representa a homogeneidade de mercado, indicando o quão transparente o mercado do setor em questão é. Quanto mais homogêneo é um determinado setor, mais provável que os seus participantes tenham conhecimento a respeito das tecnologias, das fontes de energia, seus fornecedores, aumentando a probabilidade de escolha da alternativa com maior utilidade. Uma maior homogeneidade indicaria um mercado que existem poucos participantes ou uma fonte de energia. No contrário, segmentos muito heterogêneos indicam que o conhecimento sobre as fontes de energia é menos difundido.

A probabilidade de escolha pode ser visualizada como uma curva sigmoide sobre a utilidade, onde um aumento na utilidade resulta em uma probabilidade de escolha mais elevada, embora com retornos decrescentes conforme a utilidade aumenta. Esta probabilidade é fornecida pela equação logística em função da utilidade. Essa abordagem logística fornece a probabilidade de escolha " π " para uma fonte de energia " k " de todas as fontes de energia " i ", em um setor " j ", em função da utilidade percebida " U ".

$$\pi_{k,j} = \frac{\exp(U_{i=k,j})}{\sum_i \exp(U_{i,j})} \quad \text{Equação 13}$$

Para calcular a difusão de cada fonte de energia, o modelo desenvolvido por REHFELDT (2018) elabora a equação X, que representa a diferença entre a probabilidade de escolher uma determinada fonte de energia em um determinado setor e o percentual exato daquela fonte no ano anterior, multiplicado por um parâmetro de difusão, δ . Este elemento representa fatores que podem atrasar uma determinada transição entre um combustível e outro, dado que estas diferenças na probabilidade não ocorreriam instantaneamente.

$$Share_{i,j,t} = Share_{i,j,t-1} + \delta \times (\pi_{i,j,t} - Share_{i,j,t-1}) \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

Share (i,j,t) representa o *market share* da fonte de energia, i, no setor j no ano t

Share (i,j,t-1) representa o *market share* da fonte de energia, i, no setor j no ano t-1

π (i,j,t) é a probabilidade da fonte de energia i ser escolhida pelo setor j no ano t

δ é o parâmetro da velocidade da difusão

Nesta tese, o modelo desenvolvido busca minimizar os custos em função do limite de emissões e outras restrições. Sendo assim, a curva de difusão do método desenvolvido por REHFELDT (2018) servirá como parâmetro para distribuição dos combustíveis fósseis em caso de substituição por outros renováveis. Em outras palavras, sem esta curva, a substituição de um combustível como Gás Natural por outro como Eletricidade ou Biomassa se daria unicamente pela escolha daquele substituto de menor custo, em função das emissões. Com este módulo de difusão em função das probabilidades e parâmetros setoriais, a escolha do substituto se dará acompanhando a curva definida pela Equação 14.

Como parâmetros de custos, assumiu-se que para as caldeiras a biomassa o custo de investimento de referência igual a 75 \$/MWh com base nos estudos de SALMENZAARI, (2021) e IEMA (2017) . Já para os custos das caldeiras a elétrica, o CAPEX utilizado foi de 34 \$/ MWh com base em ELEMENT ENERGY & JACOBS (2018); WEST; DE JONGE; VAN HOUT (2021).

Modelagem dos demais segmentos

A metodologia utilizada para o cálculo das emissões dos demais segmentos da indústria será feita com base no BEU, utilizando como base consumo energético útil, as medidas de eficiência energética e de substituição de combustíveis.

A primeira etapa consiste em calcular o consumo de energia. O consumo de energia em um determinado ano é dado pelo consumo específico útil de um determinado combustível em um determinado serviço energético, dividido pela eficiência, resultando no consumo específico final. Ao multiplicar este último termo pelo nível de atividade de um determinado setor e pelo percentual de uso daquele combustível.

$$CE_{n,year} = \sum_j \sum_n \frac{CEU_{n,j}}{Ef_{n,j} + \sum_k x_{k,n}} \times Prod_{year} \times (FS_{n,j} - w_{n,j}) \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

- CE é o consumo energético no ano;
- CEU é o consumo específico útil do serviço energético j combustível n;
- Prod é o nível de atividade do segmento;
- Ef é a eficiência do combustível n para o serviço j;
- FS é o percentual do combustível dentro da matriz energética do setor;
- x é o ganho de eficiência da medida de eficiência energética das medidas de eficiência energética j;
- w é o percentual que corresponde a substituição do combustível fóssil por algum renovável

A partir do cálculo do consumo de energia é possível realizar a estimativa das emissões atreladas a esta fonte. Esta contabilidade é feita seguindo o mesmo método dos demais segmentos, que consiste no produto da quantidade de energia consumida por serviço energético.

$$TCE_energia_{year} = \sum_j \sum_n CE_{n,j} \times EF_n \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

- TCE_energia é o total de emissões proveniente das fontes de energia;

- CE é o consumo energético do combustível n referente ao serviço energético j;
- EF é o fator de emissão da fonte de energia n;

O cálculo das emissões para os segmentos de Alimentos e bebidas, Papel e celulose, Cerâmica, Não-Ferrosos, Ferroligas, Textil, Mineração e Outras indústrias é segregado em dois grupos: emissões de energia e emissões de processo industrial.

As emissões de energia são calculadas da mesma forma para todos os segmentos. O produto entre o consumo de energia de cada combustível utilizado e o fator de emissão daquele combustível nos fornece as emissões da fonte de energia no setor selecionado.

Já as estimativas para os processos industriais, elas são feitas de acordo com o inventário nacional de gases de efeito estufa.

Para o setor de não ferrosos, foram calculadas as emissões relativas à produção de alumínio. As emissões foram estimadas utilizando o fator de emissão implícito da produção de alumínio para cada uma das rotas de produção *Prebake e Soderberg*.

$$E_{t,i} = FE_{t,i} \times Q_{t,i} \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

- “E” corresponde às emissões de GEE;
- “FE” é o fator de emissão, em t CO₂/t Al;
- “Q” é a quantidade de alumínio produzida, em t Al;
- “i” se refere ao gás de efeito estufa emitido;
- “t” corresponde à tecnologia utilizada na produção de alumínio.

A Tabela 17 apresenta os valores dos fatores de emissão, FE, para cada uma das tecnologias supracitadas.

Tabela 17 - Fator de emissão por tecnologia de produção de alumínio

Tecnologia	Fator de emissão		
	t CO ₂ /t Al	kg CF ₄ / t Al	kg C ₂ F ₆ /t Al
Soderberg - VSS	1,7	0,08	0,04
Soderberg – HSS	1,7	0,04	0,03
<i>Prebaked Anode</i> - CWPB	1,6	0,04	0,04
<i>Prebaked Anode</i> - SWPB	1,6	1,6	0,4

Fonte: elaboração própria com base emMCTIC (2020)

Assim como nas modelagens dos demais segmentos, esta modelagem tem como objetivo minimizar os custos de mitigação, sujeito a restrições de emissão, penetração das tecnologias, e os limites de eficiência estabelecidos pelo Balanço de Energia Util.

$$\text{minimize } \sum_i total_capex_i + total_opex_i + fuel\ cost_i \quad \text{Equação 18}$$

$$total_capex_i = (capex_i \times P_{year} \times x_{i,year}) \cdot r \cdot \frac{(1+r)^t}{(1+r)^t - 1}$$

$$total_opex_i = opex_i \times P_{year} \times x_{i,year}$$

$$fuel_cost_f = fuel_consumption_f \times Fuel_price_f$$

Subject to:

$$penetration_i \leq penetration\ limit$$

$$penetration_i \leq efficiency\ limit$$

$$emission = emission\ reduction$$

Onde:

- CAPEX é o custo de investimento da opção de mitigação ou tecnologia em \$/t;
- P_{year} é a produção de aço em um determinado ano;
- x_{i,year} é a penetração de uma determinada tecnologia;

- r é a taxa de desconto, igual a 8%;
- t é a vida útil da tecnologia, igual a 25 anos;
- $opex$ é o custo de operação e manutenção da tecnologia;
- $fuel\ cost$ é o aumento de custo ou economia gerada pelo custo de mitigação;
- $fuel_consumption$ é a quantidade de energia consumida por cada tecnologia;
- $Fuel_price$ é o preço de uma determinada fonte de energia;
- n é a fonte de energia;

5.2. Custo Marginal de Abatimento

Uma questão central quando se trata de descarbonização é entender o quanto que custa a redução das emissões. O custo marginal de abatimento (em inglês, *Marginal Abatement Cost – MAC*) representa o custo extra de ser reduzir uma unidade de poluição, expresso em $\$/tCO_2e$ e pode ser utilizado para analisar a custo efetividade da descarbonização. O conjunto formado pelos custos marginais de abatimento de todas as tecnologias gera a uma curva conhecida, chamada de curva MAC, onde nos eixos das abscissas é representado a quantidade de gases de efeito estufa abatidas pela tecnologia e no eixo das ordenadas é apresentado o custo marginal de abatimento. Em outras palavras, a Curva MAC representa a “atratividade de uma dada medida de mitigação frente ao tamanho do seu potencial de abatimento” (DE GOUELLO et al., 2010).

A curva MAC tem sido utilizada por empresas, pesquisadores e governo para estudar a custo efetividade de tecnologias e compará-las a fim de entender quais delas são mais promissoras para serem adotadas (GRIFFIN, 2015). Como exemplo, pode-se citar os trabalhos “Opções de Mitigação de Emissões de GEE em Setores-Chave” do MCTI em parceria com o GEF (MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE, 2017a), que estimou potenciais de mitigação e custos de diversas tecnologias para os diversos setores da economia brasileira. Nesse mesmo sentido, o projeto IES-BRASIL 2050 elaborou diversos cenários de emissões de GEE para a economia brasileira e desenhou as suas curvas MAC (CENTRO CLIMA, 2017).

Em linhas gerais, o cálculo do custo marginal de abatimento pode ser feito através da equação a seguir (DE GOUELLO et al., 2010):

$$AC_n^{Atividade} = \frac{AC_n^{Abat} - AC_n^{ref}}{AE_n^{ref} - AE_n^{abat}} \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

- $AC_n^{atividade}$ é o custo de abatimento de uma tecnologia de mitigação de GEE no ano n;
- AC_n^{abat} é o custo anual líquido da tecnologia de abatimento para o ano n;
- AC_n^{ref} é o custo anual líquido da tecnologia de abatimento para o ano n no cenário de referência;
- AE_n^{abat} é a emissão de GEE anual da tecnologia de abatimento para o ano n;
- AE_n^{ref} é a emissão de GEE anual da tecnologia de referência para o ano n;

Por sua vez, o custo anual líquido (AC) representa a “*diferença do custo de investimento anualizado e do resultado financeiro anual da implantação da opção*” (HENRIQUES, 2010). Ele é fruto do custo de investimento anualizado acrescido dos gastos com operação e manutenção, combustível e receitas.

$$AC = \frac{Capex \cdot r \cdot \frac{(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} + Opex + Comb - Receita}{(1+r)^{n-ano_base}} \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

- AC é o custo anual líquido de uma tecnologia;
- Capex é o custo de investimento de uma tecnologia
- r é a taxa de desconto
- t é tempo de vida da tecnologia
- n é o ano da análise
- ano base é o ano de referência

Neste trabalho optou-se por utilizar a taxa de desconto de 8%, fixa em todo os anos da análise. Este valor está em harmonia com o Plano Nacional de Energia 2050 realizado pela EPE (EPE, 2018e).

Para fazer o desenho da curva marginal de abatimento, utilizou-se o a linguagem de programação python com o auxílio da biblioteca matplotlib e seaborn. O código que dá

origem as imagens podem ser visualizadas no sítio *GitHub* através do perfil *ottohebeda* na pasta *Marginal-abatement-cost-curve*⁶.

5.3. Cenários

Nesta tese buscou-se compreender possíveis caminhos que a indústria brasileira poderá seguir a fim de reduzir suas emissões de gases de efeito estufa e as possíveis alocações de cotas de emissões dentre os segmentos industriais com base nos princípios de equidade, custo e responsabilidade histórica. Para isso, três cenários foram desenhados.

O primeiro cenário servirá de base para comparação com os demais. Chamado de Referência, este cenário assume como premissa que não haverá restrição nos níveis de emissões de cada um dos segmentos selecionados. Com ele, poderemos visualizar a tendência das emissões e o perfil energético do setor caso não haja alteração na estrutura produtiva da indústria brasileira. Em outras palavras, foram conservadas as informações do consumo específico, fatores de emissão dos processos bem como a participação das rotas tecnológicas.

O segundo cenário (Cenário A) se alinha com estudos realizados que projetam emissões nulas líquidas para o Brasil em 2050. No estudo desenvolvido por LA ROVERE et al. (2021) um cenário de descarbonização da economia brasileira (*Deep Decarbonization Scenario – DDS*), onde as emissões totais do país precisam atingir o nível líquido zero em 2050. Para atingir esta meta, foi considerado para o setor industrial apenas a implementação de medidas de mitigação com alta maturidade tecnológica, como eficiência energética e substituição de combustíveis. Isto foi feito por causa dos possíveis impactos causados pela necessidade de altos investimentos nos custos de produção e, conseqüentemente, na competitividade da indústria brasileira. Como resultado, as emissões do setor industrial permaneceram virtualmente constantes em todo o período. Apesar de não haver redução relativa ao ano base no período, o país consegue atingir seu compromisso climático graças às remoções de carbono gerado pelo setor florestal. Neste sentido, o cenário A terá premissa similar: será considerado que os níveis de emissões em todo período de análise serão iguais ao do ano base (2020). Desta forma pode-se estudar quais são as tecnologias e seus custos

⁶ O link para a página é https://github.com/ottohebeda/Marginal-Abatement-Cost-Curve/blob/main/MAC_v0.1

necessários para o setor industrial se alinhar com um cenário de descarbonização da economia brasileira que não gere pressão demasiada sobre o setor.

O terceiro cenário (Cenário B) busca entender os caminhos da indústria brasileira com maior demanda por descarbonização. Para isso, foi usado como referência o *Sustainable Development Scenario* (SDS) apresentado pela IEA (Figura 15). Este cenário atinge os principais objetivos energéticos ligados à agenda de desenvolvimento sustentável da ONU e está alinhado com o Acordo de Paris. Em termos de emissão, o SDS atinge o nível de emissões líquidas zero em 2070, com uma redução de 54% até 2050. Tendo em vista estes parâmetros, o terceiro cenário de análise desta tese deverá ter como limite de emissões uma meta de redução de 50% no ano de 2050.

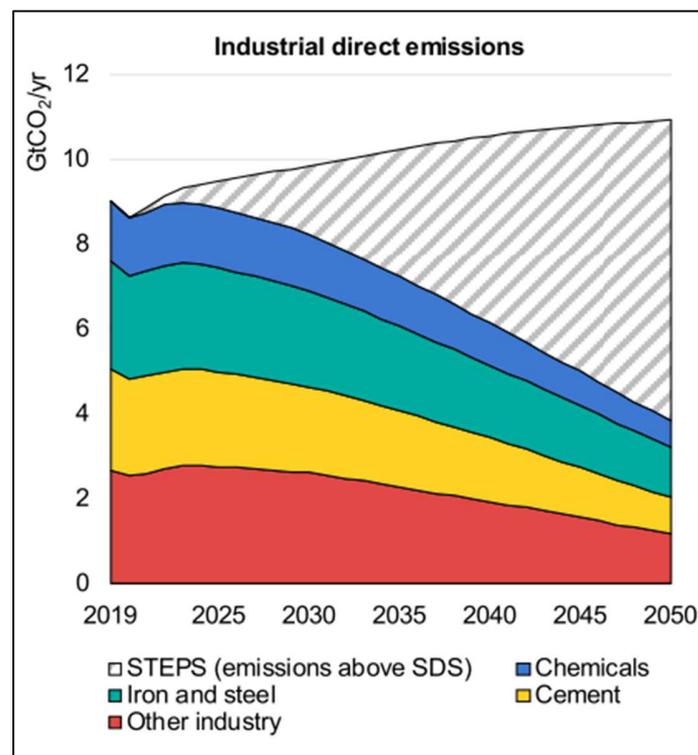


Figura 15 - Emissões diretas da Indústria global no cenário SDS
Fonte: elaboração própria com base em IEA (2020a)

Outra variável exógena necessária para alimentar os modelos é o nível de atividade do setor industrial. O foco central desta tese está em entender os possíveis caminhos de descarbonização e seus impactos, e não a projeção da produção industrial, o que exigiria um esforço maior na elaboração de premissas macroeconômicas. Desta forma, optou-se por

utilizar os níveis de atividade do estudo desenvolvido para a economia brasileira de LA ROVERE et al. (2021). Nele, os autores consideram um crescimento populacional de 210 milhões de habitantes em 2019 para 233 em 2050, em uma projeção baseada nos dados do IBGE disponíveis à época (IBGE, 2020). Na economia, o estudo considerou uma taxa média anual de crescimento de 2,5%, 2,25% e 2,00% em cada uma das três décadas até 2050. No caso da Indústria as taxas consideradas foram de um crescimento médio anual para os mesmos três períodos de 2,38%, 2,13% e 1,48% (Tabela 18).

Tabela 18 - taxa média anual de crescimento da indústria e de seus segmentos industriais

Setor	2020-2030	2030-2040	2040-2050
Alimentos e bebidas	2.9%	1.6%	1.2%
Papel e Celulose	2.4%	2.7%	1.9%
Cimento	3.6%	1.9%	1.8%
Siderurgia	2.0%	1.7%	1.3%
Não Ferrosos	1.6%	1.5%	1.1%
Química	2.0%	1.2%	0.9%
Mineração	1.5%	1.2%	0.9%
Resto da Indústria	2.5%	2.0%	1.5%
Indústria total	2.9%	1.6%	1.2%

Fonte: elaboração própria com base em LA ROVERE et al. (2021)

A Figura 16 apresenta o crescimento dos segmentos industriais relativos ao ano base (2020). Dentre eles, aqueles que mais se destacam são os segmentos de Cimento e Papel e celulose com um crescimento que dobra a sua produção até 2050. Além deste, os segmentos da indústria de Alimentos e Bebidas e o Resto da Indústria também apresentam crescimentos expressivos na ordem de 75% em relação à 2020. Dos 8 segmentos industriais desagregados, apenas a Mineração teria um crescimento da produção inferior a 50% no período de 2020 a 2050 (LA ROVERE et al., 2021).

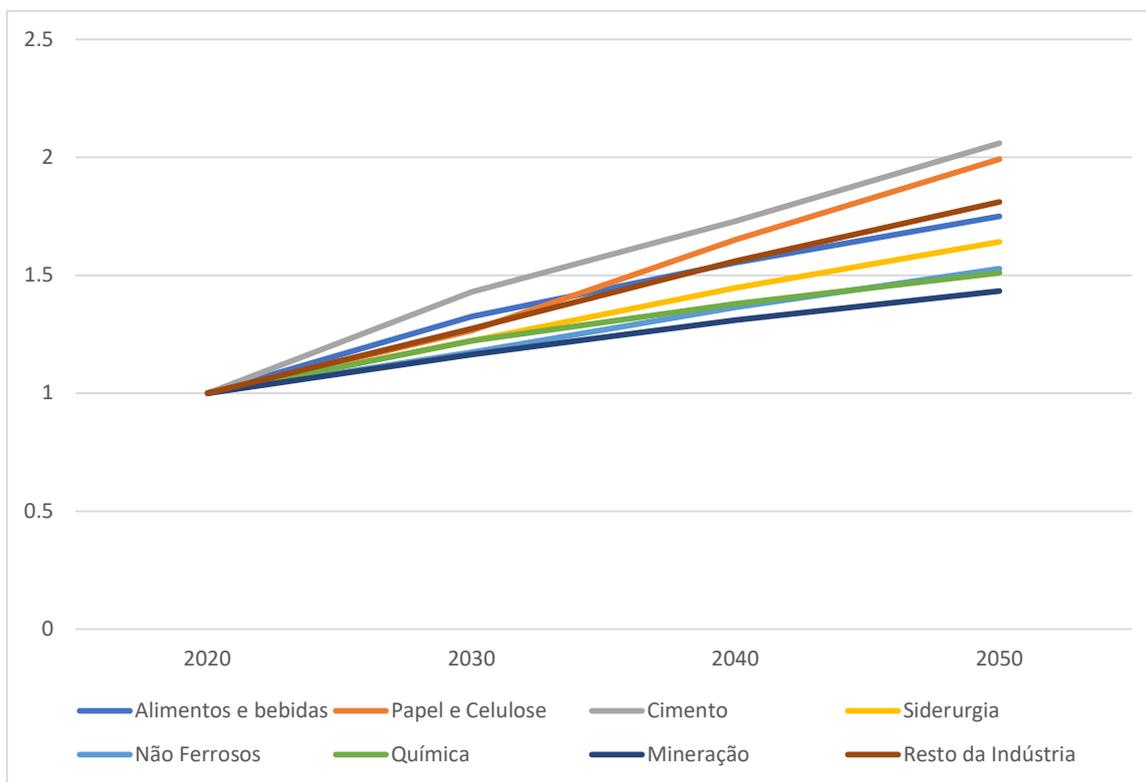


Figura 16 - Nível de atividade dos segmentos industriais entre 2020 e 2050

Fonte: elaboração própria com base em LA ROVERE et al. (2021).

5.4. Ferramentas de cálculo

Para realizar as operações matemáticas descritas na metodologia, foi utilizado como base a linguagem de programação Python. Desenvolvida em 1991, ela é uma linguagem orientada a objetos e de sintaxe simples (LANGTANGEN, 2008). A escolha do Python foi feita por causa da sua facilidade de uso, da grande comunidade de desenvolvedores e a vasta quantidade de bibliotecas que expandem o seu uso (NREL, 2022). Para complementar a linguagem de programação, foram utilizadas algumas de suas bibliotecas para desenhar o código que representa o modelo matemático desta tese.

O desenvolvimento do modelo de otimização foi feito com base na biblioteca Pyomo. Ela é uma linguagem de modelagem algébrica que atua como uma extensão do Python, usufruindo de sua sintaxe simples para elaboração de modelos complexos de programação linear (WATSON, 2018).

Para auxiliar nas operações algébricas, utilizou-se também a biblioteca Numpy. Ela adiciona ao Python ferramentas de matrizes e arranjos⁷ (OLIPHANT; MILLMA, 2006). Outra biblioteca utilizada nas operações matemáticas deste modelo foi o Pandas, ferramenta que permite a manipulação e análise de dados que permite trabalhar com dados em planilha como .csv, .xlsx, entre outros (PANDAS, 2024).

Por fim, entendendo a importância de melhorar a transparência, credibilidade e avanço científico, o código desenvolvido está hospedado na plataforma GitHub, um *site* que permite o desenvolvimento, gerenciamento e armazenamento de códigos de programação. O modelo desenvolvido nesta tese, bem como os dados que o alimenta, se encontra hospedado no perfil (ottohebeda) na pasta (Industry_Energy_Emissions_simulator)⁸.

⁷ Arranjos, em inglês *array*, são uma estrutura utilizada em programação que se refere a um conjunto de elementos que podem ser identificados por um índice.

⁸ Pode ser acessado pelo link: https://github.com/ottohebeda/Industry_Energy_Emissions_simulator

6. Resultados

Nesta seção serão abordados os resultados encontrados relativos à modelagem das emissões de GEE no setor industrial brasileiro, as mudanças no perfil de consumo energético, as principais tecnologias responsáveis pela mitigação de GEE e seus custos.

6.1. Cenário Referência

O cenário Referência será utilizado nesta tese para entender um possível caminho das emissões industriais brasileiras, caso não haja mudança na estrutura produtiva industrial. Como este cenário não apresenta mudanças na estrutura dos segmentos industriais, a variação do consumo energético no setor é influenciada pelo crescimento de cada indústria. Nesta seção serão abordados os resultados do consumo de energia, uma das principais fontes de emissão do setor, bem como as emissões de processo.

Em relação ao consumo energético, a indústria apresenta um crescimento de 65% no cenário Referência entre 2020 e 2050, o que representa uma taxa de média anual de 1,7%. O aumento do crescimento do consumo energético do período ficou um pouco abaixo da média de crescimento do PIB do setor (2,07%) (Tabela 19).

Ao desagregar este consumo de energia pelas fontes, pode-se identificar que aquelas que apresentam maior crescimento relativo são o coque de petróleo e os resíduos, cujos valores praticamente dobraram até 2050. Isto ocorre pois ambos os combustíveis são utilizados pelo setor cimenteiro. Dentre todos os segmentos industriais, a indústria de cimento é aquela que mais cresceu, chegando a dobrar de produção entre 2050 e 2020.

Outro segmento industrial que contribui para o aumento do consumo energético do setor é a siderurgia. O aumento da produção do aço e ferro-gusa impactam na demanda de coque de carvão mineral e carvão vegetal, principais fontes de energia deste segmento. O consumo destes combustíveis cresce na ordem de 75%, entre 2020 e 2050.

Tabela 19 - Consumo energético por combustível da indústria de Ferro-gusa e Aço

Fontes	Consumo energético (PJ)				Crescimento relativo a 2020 até 2050
	2020	2030	2040	2050	

Bagaço de cana	760	910	1.079	1.265	66%
Biodiesel	1	0	1	1	67%
Carvão metalúrgico	88	111	133	154	76%
Carvão mineral	62	67	73	77	25%
Carvão vegetal	179	224	269	312	74%
Coque de Carvão mineral	273	346	415	480	76%
Coque de petróleo	119	171	207	246	106%
Eletricidade	716	857	1.005	1.149	61%
GLP	28	33	40	42	55%
Gás cidade	44	56	68	78	76%
Gás natural	304	374	443	484	59%
Lenha	300	342	407	429	52%
Lixívia	288	354	426	496	73%
Óleo combustível	58	62	68	72	28%
Óleo diesel	40	47	56	66	69%
Outras fontes secundárias	150	176	206	230	61%
Resíduos	16	22	27	32	106%
Total	3425	4.154	4.922	5.615	65%

Fonte: elaboração própria

Como neste cenário não há mudança de tecnologia na produção industrial brasileira, não houve grandes variações no perfil da matriz energética em termos relação a proporção de fontes renováveis e fósseis (Tabela 20). Ao longo do período analisado, o percentual de fontes renováveis se manteve próximo aos 66% e as fósseis, 34%. A pequena variação deste percentual entre 2020 e 2050 é causado pela participação dos segmentos dentro da indústria. A leve queda do percentual de fontes não fósseis indica que houve um crescimento mais acentuado de indústrias com maior participação de fontes fósseis em suas matrizes energéticas, com o os setores de ‘Alimentos e Bebidas’ e ‘Papel e Celulose’.

Tabela 20 - Percentual de fontes renováveis e fósseis no cenário de referência

Fontes	2020	2030	2040	2050
Renováveis	65,9%	65,3%	65,3%	65,6%
Fósseis	34,1%	34,7%	34,7%	34,4%

Fonte: elaboração própria

Em relação às emissões totais, há um crescimento de 30% até 2030, saindo de 127 para 164 MtCO_{2e}. Olhando para todo o período da análise, as emissões do setor industrial apresentam uma tendência de atingir o nível de 224 MtCO_{2e} em 2050. Este valor representa um crescimento de 77% em comparação com o ano base, 2020.

Ao analisar este crescimento frente as emissões totais do Brasil em 2020, este crescimento representa um impacto drasticamente inferior. Contra aproximadamente 1.785 MtCO_{2e} (MCTI, 2023) emitidos pelo país em 2020, o aumento de 127 para 224 MtCO_{2e} do setor industrial brasileiro representaria um crescimento na participação do setor nas emissões totais de 8% para 13,4%, caso as emissões dos demais se mantiverem constantes.

Entretanto, é importante destacar que a pressão internacional para redução da pegada de carbono de nossas exportações para os países avançados colocará o setor industrial em posição mais relevante em termos de emissão nos próximos anos (UNIÃO EUROPEIA, 2023). Um exemplo disso é o *Carbon Border Adjustment Mechanism* (CBAM) implementado na UE, que prevê um pagamento de taxa aduaneira sobre produtos exportados para o continente. Este mecanismo de precificação de carbono foi implementado para colocar um preço sobre o carbono emitido de produtos importados pela UE, equiparando com a sua precificação interna garantindo justiça aos seus produtores locais e estimulando uma produção industrial mais limpa fora dos países do bloco (EUROPEAN COMMISSION, 2023a).

Ao olhar segmento a segmentos, as indústrias apresentaram crescimento de suas emissões entre 64% e 106% entre 2020 e 2050, sendo a indústria de cimento aquela que apresentou maior crescimento e cerâmica, têxtil, e outras indústrias as menores. Neste cenário, as três indústrias mais emissoras do país (Aço, Química e Cimento) permanecem como as mais relevantes. No entanto, a sua participação no total do setor sobe de 73% para

79%, com uma aproximação do setor cimenteiro ao setor de ferro-gusa e aço em termos de emissão, totalizando 71 e 75 MtCO_{2e} respectivamente. É importante destacar que as emissões apresentadas neste trabalho, na Tabela 21 abaixo, incluem tanto as emissões devidas ao consumo de energia na indústria quanto as emissões de processos industriais.

Tabela 21 - Emissões de GEE por setor entre 2020 e 2050 no Cenário de Referência

Setor	Emissões de GEE (MtCO _{2e})				Crescimento no período entre 2020 e 2050
	2020	2030	2040	2050	
Ferro-gusa e aço	42	54	65	75	76%
Cimento	34	49	59	71	106%
Química	16	23	27	31	89%
Alimentos e Bebidas	5,6	6,7	8,0	9,4	66%
Papel e celulose	4,6	5,6	6,8	7,9	73%
Cerâmica	4,2	5,0	6,0	6,9	64%
Mineração	3,4	4,2	5,2	6,2	81%
Não-ferrosos	10	11	11	11	10%
Ferroligas	1,0	1,2	1,4	1,6	65%
Têxtil	0,51	0,61	0,72	0,84	64%
Outras indústrias	3,8	4,5	5,3	6,2	64%
Total	127	165	195	227	81%

Fonte: elaboração própria.

6.2. Cenário A

Nesta seção são abordados os resultados encontrados no cenário onde foi considerada uma limitação das emissões de gases de efeito estufa ao mesmo nível das emissões do ano base (2020). Estes resultados servirão para mostrar qual é o esforço necessário para que a indústria brasileira se mantenha no patamar de 2020, indicando o papel das tecnologias de mitigação para atingir esta meta de emissão de GEE.

6.2.1. Nível de emissão e perfil energético

O primeiro resultado que merece destaque é o consumo de energia em cada um dos segmentos analisados (Tabela 22). Os resultados mostram um aumento de 66% no consumo total entre 2020 e 2050, com destaque para os segmentos de Cimento, Não-ferrosos, Papel e celulose e Químico. Estes segmentos apresentaram um crescimento próximo de 75%. Em linhas gerais, não há mudança na participação dos segmentos em relação ao consumo total da indústria, sendo aproximadamente 30% do consumo de energia industrial concentrada nos segmentos de aço, química e cimento ao longo do período analisado.

Tabela 22 - Consumo energético por segmento entre 2020 e 2050 no Cenário A

Setor	Consumo energético (PJ)				Crescimento relativo a 2020
	2020	2030	2040	2050	
Ferro-gusa e aço	638	708	842	955	50%
Cimento	167	239	267	274	64%
Química	253	289	343	395	56%
Alimentos e Bebidas	1.020	1.215	1.441	1.692	66%
Papel e celulose	550	676	810	946	72%
Cerâmica	156	192	232	274	76%

Mineração	90	105	128	151	68%
Não-ferrosos	202	261	316	363	79%
Ferroligas	55	63	75	87	58%
Têxtil	31	38	44	51	63%
Outras indústrias	264	318	376	437	66%
Total	3.425	4.103	4.874	5.625	64%

Fonte: elaboração própria.

A Tabela 23 desagrega o consumo energético em função de cada uma das fontes de energia utilizadas pelo setor industrial. Um ponto de destaque é o crescimento de combustíveis renováveis entre 2020 e 2050. O consumo de carvão vegetal cresceu 245% neste período, puxado principalmente pela demanda do setor siderúrgico. Outro combustível que merece atenção especial é chamado resíduos. No intervalo entre 2020 e 2050 essa fonte cresceu 1.307%. Essa elevada variação se justifica pela demanda oriunda da necessidade da redução das emissões no setor cimenteiro, um dos maiores consumidores de energia da indústria. Além disso, este resultado é fruto do alto potencial de mitigação que esta tecnologia apresenta dentro da indústria de cimento.

Em linhas gerais, houve redução de consumo de combustíveis fósseis, com destaque para o Coque de Petróleo, com uma queda de 97% em relação ao ano base, o óleo diesel com redução de 16%, óleo combustível e o carvão metalúrgico com uma redução de 9% e outras fontes secundárias de petróleo com 24%. O principal fator para redução do consumo destas fontes é sua substituição por outras fontes renováveis. Em relação ao coque de petróleo, muito utilizado pela indústria de cimento, este passa a ser substituído pelos resíduos, combustível que apresentou maior crescimento relativo no período.

É importante destacar que apesar da redução das emissões neste cenário, há um aumento do consumo de diversos combustíveis fósseis. Um exemplo é o carvão metalúrgico, cujas emissões subiram 28% entre 2020 e 2050. Isto acontece devido ao aumento de produção

dos segmentos industriais, que no caso do carvão metalúrgico, é puxado pela demanda da indústria siderúrgica.

Tabela 23 - Consumo energético por fonte de energia entre 2020 e 2050 no Cenário A

Fontes	Consumo energético (GJ)				Crescimento relativo a 2020
	2020	2030	2040	2050	
Bagaço de cana	760	909	1079	1264	66%
Biodiesel	1	1	1	1	66%
Carvão metalúrgico	88	86	83	80	-9%
Carvão mineral	62	74	64	49	-30%
Carvão vegetal	179	287	459	606	236%
Coque de Carvão mineral	273	269	260	253	-8%
Coque de petróleo	119	41	6	4	-97%
Eletricidade	716	924	1123	1320	82%
GLP	28	22	28	32	19%
Gás cidade	44	40	39	38	-15%
Gás natural	304	326	298	297	12%
Lenha	300	411	546	685	130%
Lixivia	288	354	426	496	73%
Óleo combustível	58	45	44	47	-18%
Óleo diesel	40	23	28	33	-17%
Outras fontes secundarias	150	139	183	199	51%

Resíduos	16	152	210	220	1307%
Total	3425	4103	4874	5625	66%

Fonte: elaboração própria.

Um indicador relevante para compreendermos a descarbonização do setor industrial é a proporção entre as fontes fósseis e renováveis (Tabela 24). Em 2020, cerca de 2/3 do consumo de energia era proveniente de fontes renováveis. Neste cenário, onde as emissões são limitadas ao valor de referência de 2020, a proporção de fontes renováveis no setor industrial cresceu para 82% em 2050.

Tabela 24 - Participação de fontes renováveis e fósseis no cenário A entre 2020 e 2050

Fontes	2020	2030	2040	2050
Renováveis	66%	75%	79%	82%
Fósseis	34%	25%	21%	18%

Fonte: elaboração própria.

As emissões de cada segmento industrial resultam do limite estabelecido como premissa para o cenário analisado (Tabela 25). Neste caso, o cenário foi definido limitando as emissões ao nível do ano base (2020), assim, todos os segmentos industriais tiveram suas emissões iguais a este ano. Entretanto, apesar de não haver redução em relação ao ano base, estas emissões apresentam redução em relação ao cenário de Referência, onde não há alteração na estrutura dos segmentos industriais. Em termos relativos, as indústrias de Ferro-gusa e Aço, Cimento e Química tiveram uma queda de 43%, 51% e 47% em relação ao ano de 2050 no cenário de referência. Este resultado representou uma diminuição de 83 MtCO_{2e} neste último ano de análise, em outras palavras, este resultado equivale a 83% das emissões abatidas.

Tabela 25 - Emissões por segmento entre 2020 e 2050 no Cenário A e de Referência

Setor	Emissões (Mt CO_{2e})						
	2020	Cenário A			Cenário Referência		
		2030	2040	2050	2030	2040	2050

Ferro-gusa e aço	43	43	43	43	54	65	75
Cimento	34	34	34	34	49	59	71
Química	16	16	16	16	23	27	31
Alimentos e Bebidas	5,6	5,6	5,6	5,6	6,7	8,0	9,4
Papel e celulose	4,6	4,6	4,6	4,6	5,6	6,8	7,9
Cerâmica	4,2	4,2	4,2	4,2	5,0	6,0	6,9
Mineração	3,4	3,4	3,4	3,4	4,2	5,2	6,2
Não-ferrosos	10,3	10,3	10,3	10,3	11	11	11
Ferroligas	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2	1,4	1,6
Têxtil	0,5	0,5	0,5	0,5	0,61	0,72	0,84
Outras indústrias	3,9	3,8	3,8	3,8	4,5	5,3	6,2
Total	126,7	126,7	126,7	126,7	165	195	227

Fonte: elaboração própria.

6.2.2. Resultados tecnológicos por setor

Esta seção reúne os principais resultados desagregados pelos segmentos industriais estudados nesta tese. O objetivo é destacar quais são as tecnologias selecionadas pelo modelo para atingir os níveis de emissão estabelecidos, a variação na demanda de energia, e os custos de mitigação.

Ferro-gusa e aço

No cenário onde o limite de emissões é igual ao nível de 2020, o setor de ferro-gusa e aço poderá cumprir com a sua meta majoritariamente utilizando tecnologias já estabelecidas (Figura 17). Neste cenário, a principal tecnologia responsável pela redução das emissões são os fornos a arco elétrico. Partindo de 24% em 2020, esta tecnologia responde por 37% da produção em 2050. O aumento do uso desta tecnologia, entretanto, está condicionado pela oferta de sucata ferrosa, matéria prima principal desta tecnologia.

Os fornos de carvão vegetal também contribuem para mitigação de GEE na indústria de aço. A partir de 2038, a participação desta tecnologia na produção nacional começa a crescer, saindo de 7% para 16% em 2050. Esta tecnologia teve seu crescimento restringido por causa da sua baixa produtividade, como mencionado na seção metodológica.

Já em relação a tecnologias inovadoras, a partir de 2030 a necessidade por redução das emissões é atendida pela inserção da fusão redutora (SR) utilizando biomassa como forma de produzir aço. O nível desta tecnologia cresce nas décadas seguintes atingindo 11% em 2050. Dentre as tecnologias inovadoras listadas, esta foi aquela que apresentou menor custo de mitigação. É importante destacar que as perspectivas futuras do desenvolvimento de tecnologias inovadoras são incertas, mesmo considerando a evolução da curva de aprendizado, como fora feito neste trabalho.

Por um lado, a indústria siderúrgica consegue limitar as emissões utilizando majoritariamente tecnologias já conhecidas. Por outro, a partir de 2030 seria necessário que tecnologias hoje inovadoras estejam operando para que se controle os níveis de emissão do setor. Apesar de não ser uma quantidade expressiva até meados da década de 30, os recursos utilizados em tecnologias tradicionais não serão suficientes para trazer maiores reduções das emissões.

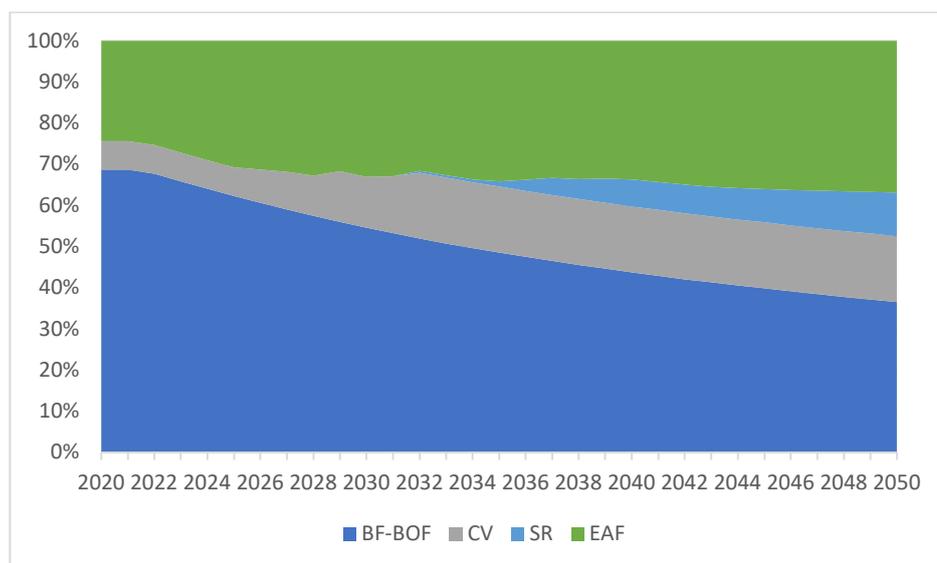


Figura 17 - Participação das tecnologias na produção de Aço no Cenário A
Fonte: elaboração própria.

Este novo perfil de produção tem como principal impacto o aumento da demanda por eletricidade e carvão vegetal. A Tabela 26 mostra a matriz energética do setor de ferro-gusa e aço entre 2020 e 2050. O consumo de fontes fósseis diminui ao longo dos anos, em destaque, o coque de carvão mineral passa de 42% para 26% em 2050. Isto é resultado da substituição da tecnologia BF-BOF a carvão mineral pela produção da rota integrada a carvão vegetal, EAF e SR. Neste sentido, o carvão vegetal é o combustível que mais apresenta crescimento, saindo de 19% em 2020 chegando a 39% em 2050, se tornando a principal fonte de energia da siderurgia já em 2040.

Apesar do crescimento substancial da produção de aço através de EAF o consumo de eletricidade cresceu apenas 2%. Isto ocorre, pois esta tecnologia apresenta maior eficiência o que garante que o consumo de eletricidade tenha um crescimento relativo mais modesto.

Tabela 26 - Matriz energética industrial em porcentagem entre 2020 e 2050

Fontes	2020	2030	2040	2050
Carvão metalúrgico	14%	12%	10%	8%
Carvão vegetal	19%	23%	33%	39%
Coque de carvão mineral	42%	37%	30%	26%
Eletricidade	10%	11%	12%	12%
GLP	0%	0%	0%	0%
Gás cidade	7%	6%	5%	4%
Gás natural	7%	9%	9%	9%
Óleo combustível	0%	0%	0%	0%
Óleo diesel	0%	0%	0%	0%
Outras fontes secundarias	1%	1%	1%	1%

Fonte: elaboração própria.

Cimento

A indústria de cimento apresentou uma mudança significativa no seu perfil energético ao longo dos anos projetados no cenário A. Os fatores que contribuem para a redução das emissões da indústria de cimento são o aumento da utilização de resíduos nos fornos rotativos e a implementação de medidas de eficiência energética (Tabela 27). No curto prazo, a principal forma de redução das emissões aconteceu pelo aumento da utilização de resíduos na produção de cimento. Até 2030, o percentual de combustíveis alternativos atinge o nível de 63%. No período entre 2030 e 2040, a utilização de combustíveis alternativos cresce até atingir o patamar de 80%, valor limite definido como restrição na seção metodológica. Além disso, a partir de 2030 o aumento do uso de adições ao cimento contribui para a queda das emissões, diminuindo a razão de clínquer/cimento de 64% para 59%. Por fim, no último período, com o uso de combustíveis alternativos no seu limite, há um aumento do uso de adições, reduzindo a razão clínquer/cimento para 52%.

Houve uma redução da intensidade energética na produção de clínquer a partir de 2030. Medidas de eficiência energética apresentam custos mais elevados do que a substituição de combustíveis. Desta forma, o modelo deu prioridade para utilização de combustíveis alternativos frente a implementação de medidas de eficiência energética. A intensidade energética apresentou uma redução de 20%, saindo de 4,27 GJ/t clínquer para 3,40 em 2050.

A indústria de cimento possui um elevado nível de emissões do processo fruto das reações de calcinação. Além da redução da razão clínquer/cimento outras tecnologias que pode ser utilizada para reduzir as emissões de processo é a captura de carbono. Para atingir o nível de emissão estabelecido pelo cenário o segmento conta com a remoção de pouco menos de 5% das suas emissões em 2050 através da implementação de CCS.

Similar ao setor siderúrgico, os resultados da indústria de cimento indicam que a maior parte das emissões podem ser atingidas utilizando tecnologias já maduras, como a substituição de coque por combustíveis alternativos como resíduos, melhoria da eficiência energética e redução da razão clínquer/cimento. Entretanto, há uma parcela das emissões que não conseguem ser abatidas com essas medidas, fazendo-se necessário utilizar de tecnologias ainda não disponíveis no mercado como o CCS.

Tabela 27 - Indicadores da indústria de cimento entre 2020 e 2050 no Cenário A

Indicador	2020	2030	2040	2050
Clínquer/Cimento	64%	64%	59%	52%
Intensidade energética (GJ/t clínquer)	4,27	4,27	3,95	3,40
% combustíveis alternativos	0%	63%	80%	80%
CCS	0	0	0	4,85%

Fonte: elaboração própria

A Figura 18 apresenta os resultados do consumo energético. Como mencionado anteriormente, os principais fatores que influenciam no comportamento da demanda de energia pela indústria de cimento são a penetração de medidas de eficiência energética e a substituição dos combustíveis fósseis por outros alternativos. Neste cenário A, há um aumento do consumo de energia entre 2020 e 2030, carregado pelo crescimento da produção de cimento. No segundo período entre 2030 e 2040 o setor apresenta um crescimento do consumo energético menos acentuado, graças aos ganhos de eficiência energética que ocorrem no período. A partir de 2040, os ganhos de eficiência continuam, permitindo passar de 3,95 para 3,40 GJ/ t clínquer enquanto a utilização de combustíveis alternativos já atingiu o seu potencial (80%). Estes dois fatores garantem um menor crescimento do consumo de energia nos últimos 10 anos da análise.

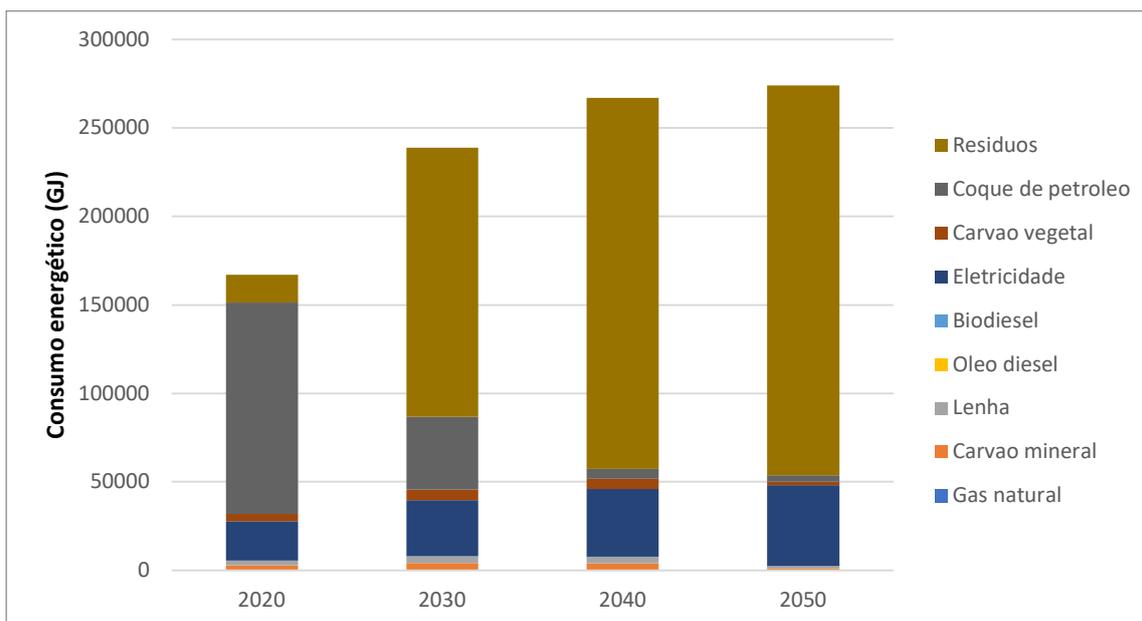


Figura 18 - Consumo energético entre 2020 e 2050 na indústria de cimento no Cenário A
 Fonte: elaboração própria.

Química

O consumo de energia na indústria química tende a aumentar no cenário A partindo de 225 mil PJ em 2020 para quase 400 mil PJ (Figura 19). Este crescimento no consumo de energia é, majoritariamente, suprido pela eletricidade que passa a se tornar a principal fonte de energia do setor, seguido de um aumento da utilização de carvão vegetal. Em 2020, estas fontes de energia correspondiam a 31% e 1% respectivamente, totalizando 46% e 12% em 2050.

As fontes fósseis tiveram sua participação relativa diminuída no período estudado. Entretanto, o seu consumo absoluto cresceu. Considerando que este cenário não permite o aumento das emissões, isto indica que as emissões de processo foram reduzidas no período para atingir os objetivos definidos pelo cenário.

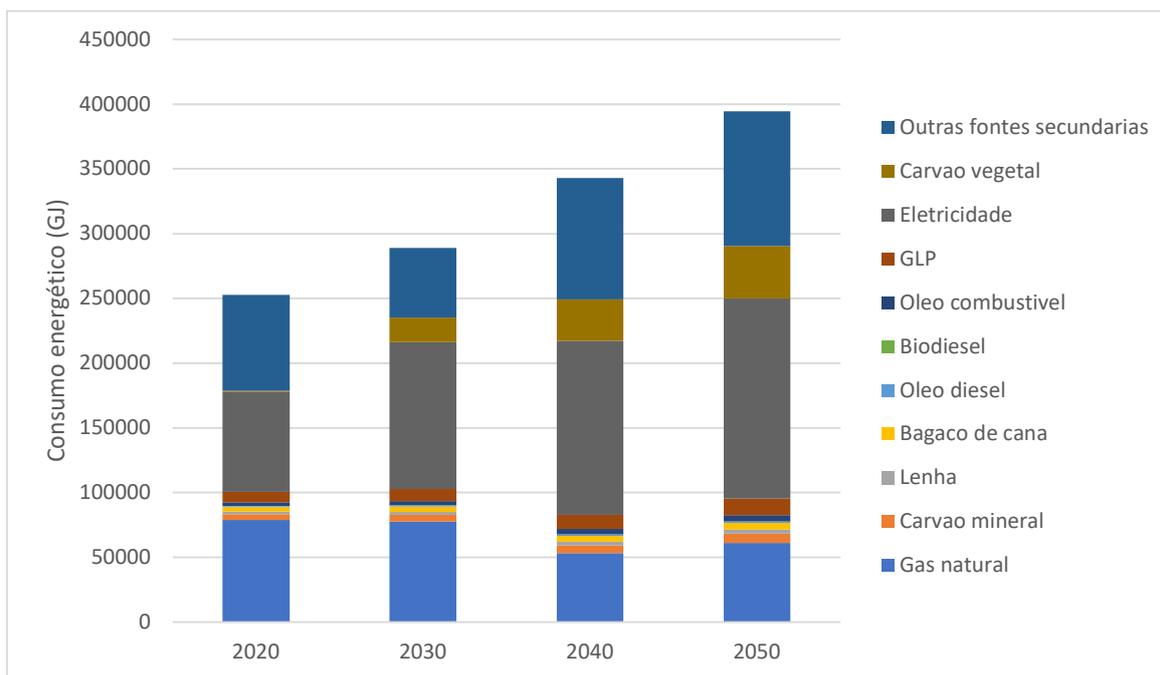


Figura 19 - Consumo energético entre 2020 e 2050 na indústria química no Cenário A
 Fonte: elaboração própria.

Além da substituição de combustíveis, outras medidas de mitigação são necessárias para a redução das emissões no setor da química, uma vez que esta indústria possui emissões não só da queima de combustíveis fósseis como também de seus processos.

Desde o início da série temporal há a introdução de tecnologias de baixo carbono para produção de amônia e etileno, além de medidas de eficiência energética (Figura 20). A produção de amônia verde e bioetileno apresenta o mesmo crescimento entre 2020 e 2030. Na década seguinte, a produção de amônia verde passa dos 20 aos 80% do total do setor, sendo a principal responsável para redução das emissões de processo no setor, atingindo 100% até o último ano da análise. O bioetileno, com um crescimento menos vertiginoso, passa a ser a principal rota de produção de etileno a partir dos meados da década de 40, chegando ao valor máximo, 70%, em 2050. A captura e armazenamento de carbono surge como forma complementar, com pouco menos de 3%, a partir de 2030, permanecendo constante no último período da análise.

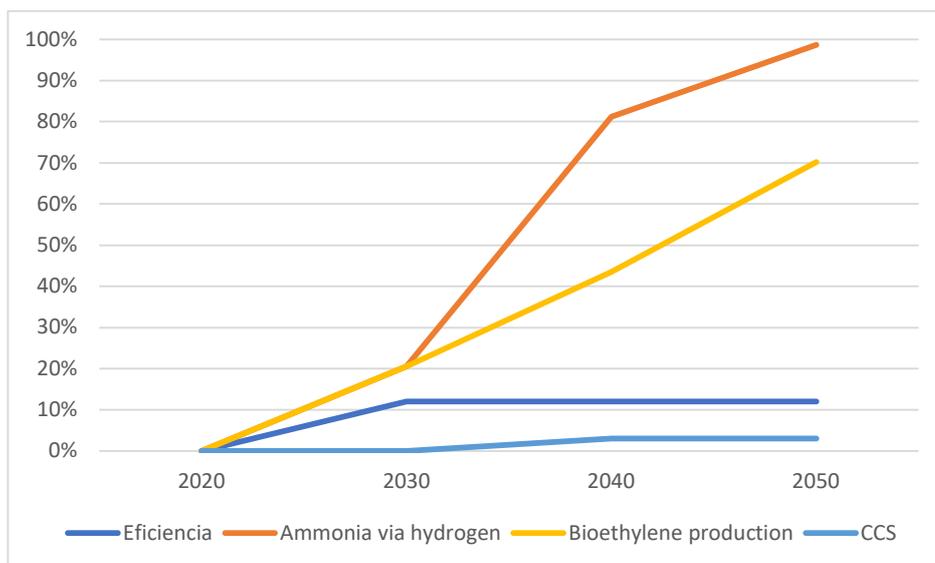


Figura 20 - Percentual de penetração das tecnologias de mitigação na indústria química entre 2020 e 2050 no Cenário A

Fonte: elaboração própria.

Demais segmentos industriais

Os demais segmentos industriais foram modelados a partir da mesma estrutura, i.e., através do balanço de energia útil de cada um. Os seus resultados serão apresentados de forma agregada, destacando o perfil do consumo de energia de seus segmentos e as principais tecnologias responsáveis pela mitigação das emissões de GEE no setor.

O primeiro indicador para entender o comportamento da mitigação das emissões dos demais segmentos industriais é o seu perfil energético. A Tabela 28 apresenta o percentual das fontes energéticas de biomassa e eletricidade na matriz de cada um dos segmentos industriais, exceto os já abordados. Em linhas gerais, já no ano base há uma elevada participação de fontes renováveis como biomassa e eletricidade na matriz energética das indústrias. Com a necessidade de limitar suas emissões, essa participação cresceu ao longo dos anos.

Para o setor de alimentos e bebidas, que já possuía 94% de renovabilidade em 2020, esse percentual apresentou uma leve elevação puxada pelo crescimento do uso de biomassa de 84 para 87% em 2050. No setor de papel e celulose, verifica-se um incremento gradual no uso de biomassa, atingindo 79% em 2050, enquanto a eletricidade mantém uma participação constante de 15% ao longo das décadas. A indústria cerâmica demonstra um crescimento do

consumo de biomassa, aumentando de 50% em 2020 para 69% em 2050 enquanto o consumo de eletricidade, por outro lado, permanece constante em 8% ao longo do período. O setor de mineração destaca-se pelo incremento do consumo de energia a partir de fontes como o carvão vegetal, partindo de 0% em 2020 e atingindo 13% em 2050. Simultaneamente, a parcela de eletricidade aumenta de 50% para 59%. Na indústria de metais não ferrosos, o consumo de biomassa, representou 12% do mix energético em 2050, em comparação com 0% em 2020. A eletricidade, por sua vez, cresce de 46% para 52%. O setor de ferroligas mostra uma estabilidade relativa no uso de eletricidade, que permanece em torno de 43-45% ao longo do período com uma pequena elevação do uso de biomassa de 40% em 2020 para 48% em 2050. Na indústria têxtil, a biomassa assume uma participação crescente, passando de 7% em 2020 para 15% em 2050 e o consumo de eletricidade também registra um aumento, indo de 0% para 8%. Finalmente, nas chamadas "Outras Indústrias", nota-se um aumento substancial na utilização de biomassa, indo de 13% em 2020 para 22% em 2050. A eletricidade, no entanto, permanece como a principal fonte de energia, representando 65% ao longo de todo o período.

Tabela 28 - Percentual de renovabilidade dos demais segmentos industriais

Setor	Fonte	2020	2030	2040	2050
Alimentos	Biomassa	84%	85%	86%	87%
	Eletricidade	10%	10%	10%	10%
Papel	Biomassa	73%	76%	77%	79%
	Eletricidade	15%	16%	16%	16%
Cerâmica	Biomassa	50%	59%	66%	71%
	Eletricidade	8%	8%	8%	7%
Mineração	Biomassa	0%	4%	10%	13%
	Eletricidade	50%	54%	57%	59%
Não-ferrosos	Biomassa	0%	7%	11%	13%
	Eletricidade	46%	54%	57%	59%
Ferroligas	Biomassa	40%	41%	45%	47%
	Eletricidade	43%	45%	45%	45%

Textil	Biomassa	7%	10%	13%	15%
	Eletricidade	65%	66%	68%	69%
Outras indústrias	Biomassa	13%	18%	20%	23%
	Eletricidade	65%	65%	65%	65%

Fonte: elaboração própria.

Os ganhos de eficiência energética nos demais segmentos industriais é apresentado pela Figura 21. Em linhas gerais, as medidas de eficiência energética resultaram em uma redução da intensidade energética de 2,3%, em média dos segmentos, entre 2020 e 2050.

O segmento de metais não-ferrosos obteve maiores ganhos de eficiência energética com quase 10%. Esse resultado, que destoa dos demais, é movido pelas altas emissões de processo do setor com baixas opções de mitigação que exigem um esforço maior de redução das emissões de energia. Além disso, a substituição da tecnologia Soderberg por Prebake atua tanto como uma medida que reduz as emissões do processo de fabricação de alumínio como quanto no aumento da eficiência energética, devido seu consumo específico ser até 15% inferior ao da tecnologia tradicional.

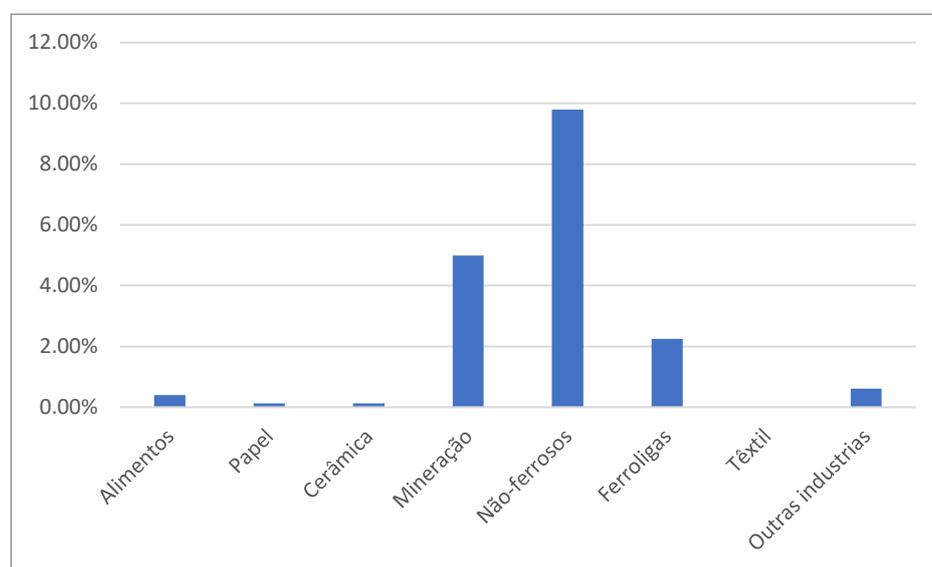


Figura 21 - Ganho de eficiência energética acumulado entre 2020 e 2050 no Cenário A para os demais segmentos industriais

Fonte: elaboração própria

Um indicador relevante para o setor é o consumo específico de energia (Figura 22). Em linhas gerais, a maior parte dos demais segmentos industriais tiveram redução do seu

consumo específico, chegando a uma queda entre 4 e 6% até 2050. Segmentos como têxtil e outras indústrias tiveram um pequeno aumento no valor deste indicador, mas ainda próximo do mesmo nível base de 2020 e a indústria de cerâmica teve seu consumo específico acrescido de 4%.

As justificativas da variação do consumo específico neste grupo de indústrias estão nas suas duas opções de mitigação. Em linhas gerais, a eficiência energética irá diminuir a quantidade de energia consumida por unidade produtiva. No outro sentido, a substituição de um combustível pode ter resultado oposto. A inserção de medidas como biomassa podem aumentar o consumo específico de um segmento industrial quando a fonte de combustível está substituindo uma fonte mais eficiente, como o gás natural.

Por exemplo, a indústria de cerâmica apresentou poucos ganhos de eficiência energética no período estudado e um aumento de 20% na utilização de fontes de biomassa na sua matriz energética. Somado, estes dois fatores contribuíram para aumentar o consumo específico do setor. Em contrapartida, a indústria de mineração teve ganhos de eficiência energética da ordem de 4% além do aumento do uso de eletricidade como fonte de energia, que também pode contribuir para a redução do consumo específico desta indústria.

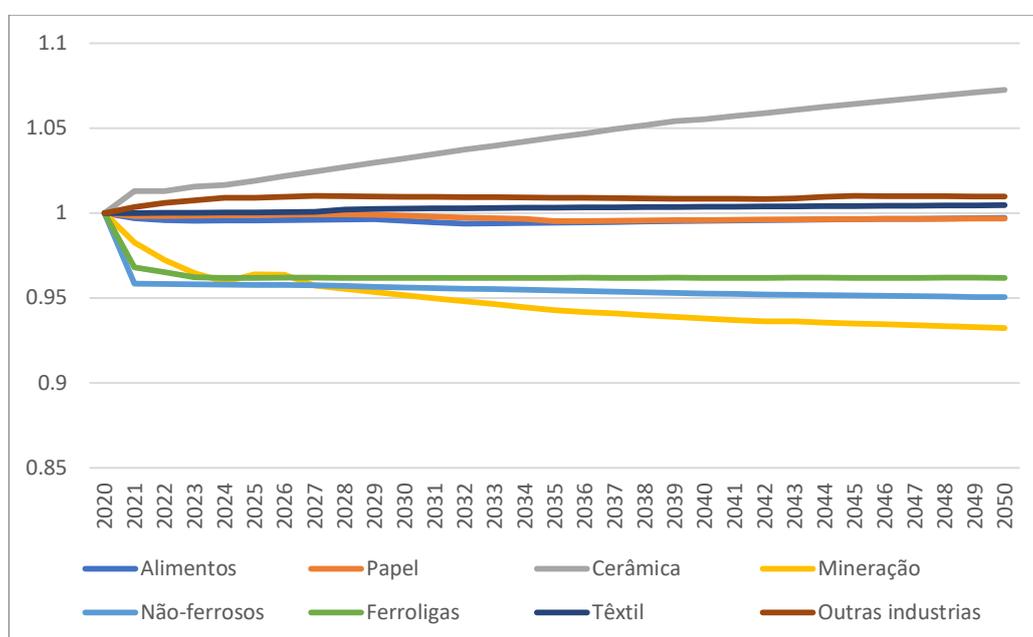


Figura 22 - Variação do consumo específico para os demais segmentos industriais entre 2020 e 2050 no Cenário A

Fonte: elaboração própria.

6.2.3. Custo de mitigação

O custo marginal de abatimento por setor em cada período de análise é apresentado na Tabela 29. Ele nos permite comparar o potencial efetivo de cada setor para atingir determinados níveis de redução das emissões.

Seis dos onze segmentos analisados apresentaram custos negativos de descarbonização, indicando que a redução das emissões poderá trazer benefícios financeiros à indústria. Para entender este resultado, é preciso retomar a modelagem desenvolvida nesta tese. No arcabouço matemático dos segmentos industriais, o único elemento capaz de trazer uma redução de custos é a redução nos custos de energia, causado tanto por ganhos de eficiência energética, quanto pela substituição de combustíveis. Como visto nas seções que destringem os resultados por segmento, a substituição de fontes fósseis por biomassa é utilizada pela indústria de forma geral. Na siderurgia, o carvão vegetal se torna a principal fonte de energia até 2050; na indústria de cimento, os resíduos chegam a 80% do consumo energético; na química, lenha e carvão vegetal somam mais de 50% da demanda de energia. Apesar das fontes de biomassa possuírem menor eficiência, seu custo inferior quando comparado com carvão mineral e coque de petróleo resultaram numa redução de custos para os segmentos industriais.

Entretanto, é importante ressaltar que os custos de combustíveis renováveis são fortemente influenciados pelos custos logísticos. Isto é, quanto maior a distância entre a geração de biomassa e o local de consumo pode tornar o seu uso muito menos competitivo.

Apesar da questão logística, a oferta das fontes de biomassa pode ser um fator relevante. Um destaque é o caso dos segmentos de ‘Alimentos e bebidas’ e ‘Papel e celulose’. Ambos os segmentos utilizam como principais fontes de energia os resíduos de sua produção, o primeiro se beneficia do bagaço de cana-de-açúcar e o segundo da lixívia.

Os segmentos que apresentaram maior custo de mitigação são, em geral, aqueles intensivos em energia. Dentre eles, destacam-se a indústria Química e de Metais Não-Ferrosos. Estes segmentos industriais possuem elevadas emissões de processos, o que exige tecnologias inovadoras ou processos menos intensivos em carbono, que possuem custos mais elevados quando comparados com os custos das tecnologias tradicionais.

A indústria de ferro-gusa e aço consegue manter custos negativos de mitigação, apesar de também ter uma parcela elevada de emissões de processo. Isto ocorre pois o setor conta com diversas rotas de produção já consolidadas e baseadas em fontes renováveis, como os fornos a arco elétrico e a BF-BOF utilizando carvão vegetal.

Outro setor que merece destaque é o de cerâmica, cujo custo marginal de abatimento diminui ao longo do período. A razão deste comportamento está na substituição de combustíveis. Conforme o setor vai introduzindo biomassa na sua matriz energética, o custo de mitigação decai.

Olhando para o CMA da indústria como um todo, podemos ver que no primeiro e segundo período o setor poderá atingir suas metas com um custo geral negativo. Entre 2021 e 2030 o CMA da indústria de é de -31 $\$/tCO_2e$ passando para -11 $\$/tCO_2e$. Apenas na década entre 2040 e 2050 que o custo passa ser positivo, entretanto, ainda um valor próximo de zero (1 $\$/tCO_2e$).

Tabela 29 - Custo Marginal de Abatimento, em $\$/tCO_2e$ entre 2020 e 2050 por década no Cenário A

Setor	CMA ($\$/tCO_2e$)		
	2021-2030	2031-2040	2041-2050
Ferro-gusa e aço	-76	-32	-16
Cimento	0	1	4
Química	0	43	57
Alimentos e bebidas	-187	-149	-111
Papel e celulose	-184	-155	-125
Cerâmica	36	24	19
Mineração e pelotização	-150	-78	-48
Não-ferrosos	-20	37	61
Ferroligas	-144	-45	-19

Têxtil	-65	-19	11
Outras indústrias	-116	-60	-36
Total	-36	-11	1

Fonte: elaboração própria.

Como mencionado na seção metodológica, os custos marginais de abatimento podem ser apresentados na forma de uma curva, o que permite uma visão geral e comparativa sobre a descarbonização. A Figura 23 apresenta esta curva para o Cenário A no ano de 2050, para fazer esta comparação. Nota-se que os segmentos que possuem maior potencial de abatimento são os de aço e cimento, sendo o primeiro com um custo negativo e o segundo com um custo ligeiramente positivo. Cerca de 42% das emissões abatidas neste período apresentam valores negativos. Como referência de custo, no estudo realizado por LA ROVERE et al. (2021) foi considerado uma precificação de carbono de 65 $\$/tCO_2e$ em 2050 em um cenário de emissões líquidas zero até 2050. Nesta tese, as emissões abatidas no cenário A em todos os segmentos industriais se encontram com custos marginais de abatimento inferiores aos 65 $\$/tCO_2e$ do estudo de LA ROVERE et al., (2021)

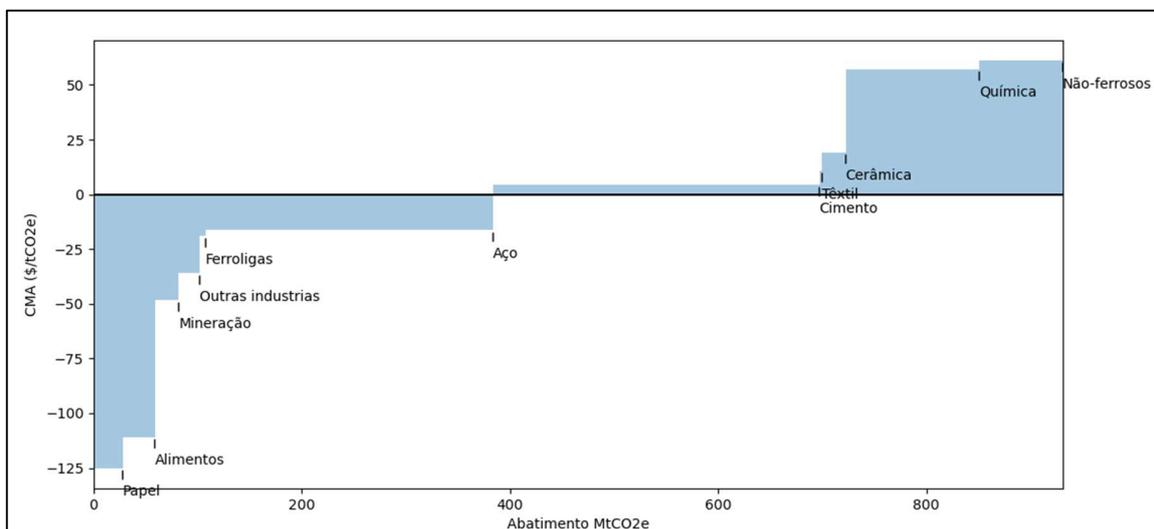


Figura 23 - Curva de Custo Marginal de Abatimento para o Cenário A em 2050

Fonte: elaboração própria

6.3. Cenário B

Nesta seção serão abordados os resultados do cenário onde as emissões de gases de efeito estufa na indústria são reduzidas linearmente até atingir em 2050 o nível de 50% do valor do ano base (2020). As informações apresentadas aqui serão análogas a aquelas da seção anterior: o perfil energético da indústria e seus segmentos, as medidas de mitigação necessárias para atingir os objetivos definidos, seus custos de mitigação e as alocações de cotas de emissões.

6.3.1. Nível de emissão e perfil energético

A Figura 24 apresenta o perfil das emissões do setor entre 2020 e 2050 considerando o alvo supracitado de redução de 50% das emissões em relação a 2020. Com esta premissa, as emissões do setor industrial deverão apresentar uma redução de, aproximadamente, 17% até 2030, 34% em 2040, até atingir o alvo de 63 MtCO₂e em 2050.

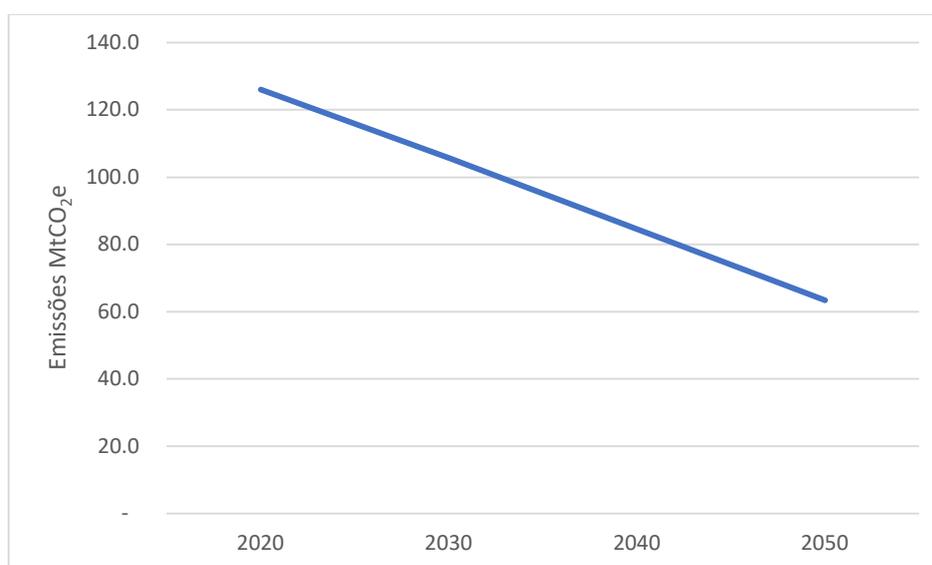


Figura 24 - Emissões da indústria brasileira entre 2020 e 2050 no Cenário B
Fonte: elaboração própria.

O consumo energético da indústria brasileira neste cenário apresentou crescimento de 64% no intervalo temporal analisado, similar ao do Cenário A (Tabela 30). Sete dos onze segmentos industriais mantiveram o consumo de energia próximo ao dos valores do primeiro cenário. Aqueles que mais se diferenciaram foram os segmentos de (i) Ferro-gusa e aço, (ii) Cerâmica, (iii) Metais não-ferrosos, (iv) Outras indústrias. Os motivos desta diferença serão

identificados a partir da análise dos indicadores de suas matrizes energéticas e tecnologias de mitigação.

Tabela 30 - Consumo energético dos segmentos industriais entre 2020 e 2050 no Cenário B

Setor	Consumo energético (PJ)				Crescimento relativo a 2020	Cenário A
	2020	2030	2040	2050		
Ferro-gusa e aço	638	697	852	917	44%	50%
Cimento	167	222	230	275	65%	64%
Química	253	289	343	395	56%	56%
Alimentos e bebidas	1.020	1.215	1.446	1.682	65%	66%
Papel e celulose	550	674	808	938	71%	72%
Cerâmica	156	196	241	285	83%	76%
Mineração e pelotização	90	104	126	149	66%	68%
Não-ferrosos	202	260	316	384	91%	79%
Ferroligas	55	63	75	87	58%	58%
Têxtil	31	38	44	51	64%	63%
Outras indústrias	264	318	382	448	70%	66%
Total	3.425	4.075	4.864	5.612	164%	64%

Fonte: elaboração própria.

Como o cenário B exige mais esforços de mitigação, a principal diferença da matriz energética em relação ao cenário A consiste na maior penetração de fontes renováveis em detrimento das fontes fósseis (Tabela 31). Como destaque, pode-se mencionar a drástica diminuição do consumo do carvão metalúrgico, mineral, coque de petróleo, coque de carvão mineral e óleo combustível. Estas fontes de energia apresentaram uma redução superior a 90%, aproximadamente, entre 2020 e 2050. O gás natural, apesar de ser uma fonte fóssil de energia, teve crescimento de 28% no período. Isto acontece pois em relação a outras fontes fósseis, o gás possui intensidade de emissões inferior, o que permite que ele atue como um

substituto. Além disso, sua redução não proporciona as mesmas quedas absolutas nas emissões, sendo menos pressionado que as outras fontes.

Dentre as fontes não fósseis, as que mais apresentaram crescimento foram o carvão vegetal, lenha, eletricidade lixívia, bagaço de cana e resíduos. As três primeiras tiveram seu consumo puxado pela substituição das fósseis, com destaque para carvão vegetal e lenha, cujos custos se apresentaram inferiores aos da eletricidade. Já a lixívia e o bagaço de cana-de-açúcar crescem mais em função do crescimento dos segmentos de alimentos e bebidas, e papel e celulose, responsáveis pela geração dessas fontes de energia. Por fim, os resíduos utilizados pela indústria de cimento tiveram o maior crescimento relativo, de 1307%, igual ao do cenário anterior, pois já com os limites estabelecidos no cenário A, a indústria já utilizaria todo o potencial em função dos baixos custos em relação a outras medidas.

Tabela 31 - Consumo energético por fonte entre 2020 e 2050 no cenário B

Fontes	Consumo energético (PJ)				Crescimento relativo a 2020
	2020	2030	2040	2050	
Bagaço de cana	760	909	1.079	1.264	66%
Biodiesel	1	1	1	1	63%
Carvão metalúrgico	88	66	46	4	-95%
Carvão mineral	62	53	17	15	-75%
Carvão vegetal	179	366	686	798	346%
Coque de Carvão mineral	273	208	148	20	-93%
Coque de petróleo	119	5	3	4	-97%
Eletricidade	716	976	1.179	1.459	105%
GLP	28	23	28	32	13%
Gás cidade	44	31	22	2	-96%
Gás natural	304	273	216	393	28%
Lenha	300	459	642	766	155%
Lixívia	288	354	426	496	73%
Óleo combustível	58	37	37	7	-88%

Óleo diesel	40	23	28	33	-17%
Outras fontes secundarias	150	116	121	95	-36%
Querosene	0	0	0	0	72%
Resíduos	16	175	185	220	1307%
Total	3,425	4,075	4,864	5,612	164%

Fonte: elaboração própria.

O crescimento do consumo de fontes renováveis é resumido pela Tabela 32. Correspondendo em 2020 a 66% da matriz energética da indústria, em 2050 o percentual de fontes renováveis atinge 87%. Mesmo com uma exigência de reduzir as emissões em 50% em relação a 2020, esforço substancialmente superior ao do cenário A, o percentual de fontes renováveis é apenas 6% maior do que no Cenário A.

Tabela 32 - Percentual de fontes renováveis entre 2020 e 2050 no Cenário B

Fontes	2020	2030	2040	2050
Renováveis	66%	77%	84%	87%
Fósseis	34%	23%	16%	13%

Fonte: elaboração própria

As emissões individualizadas pelos segmentos industriais seguem o mesmo perfil do setor. O limite de emissões restrito a 50% do nível de 2020 em 2050 é espelhado para cada um dos onze segmentos industriais estudados. Os níveis de suas emissões podem ser visualizados na Tabela 33.

Tabela 33 - Emissões por segmento entre 2020 e 2050 no Cenário B

Setor	Emissões (Mt CO ₂ e)			
	2020	2030	2040	2050
Ferro-gusa e aço	42,5	35,4	28,3	21,2
Cimento	34,4	28,7	22,9	17,2

Química	16,4	13,7	11,0	8,2
Alimentos e bebidas	5,6	4,7	3,8	2,8
Papel e celulose	4,6	3,8	3,0	2,3
Cerâmica	4,2	3,5	2,8	2,1
Mineração e pelotização	3,4	2,9	2,3	1,7
Não-ferrosos	10,3	8,5	6,8	5,1
Ferroligas	1,0	0,8	0,7	0,5
Têxtil	0,5	0,4	0,3	0,3
Outras indústrias	3,9	3,1	2,5	1,9
Total	126,7	105,6	84,4	63,3

Fonte: elaboração própria

6.3.2. Resultados tecnológicos por setor

Esta seção apresentará os resultados segmentados por setor para o Cenário B, na mesma estrutura apresentada pelo cenário A. Serão destacados as indústrias de ferro-gusa e aço, cimento e química para permitir maior detalhamento destes segmentos, principais em termos de emissão. Os demais são apresentados de forma agrupada considerando que, em linhas gerais, suas emissões são majoritariamente fruto de consumo de energia.

Ferro-gusa e Aço

O caminho de redução das emissões do cenário B para indústria de ferro-gusa e aço destoa do cenário A pela utilização da tecnologia de redução direta a gás natural (Figura 25). No curto prazo, até 2030, as tecnologias tradicionais como o forno a arco elétrico e o alto forno a carvão vegetal são as principais responsáveis pela redução das emissões. A partir de 2030 as tecnologias inovadoras de fusão redutora e redução direta se tornam os principais vetores de descarbonização do setor, em especial a primeira. A fusão redutora, por utilizar carvão vegetal como fonte energética, atinge seu limite por volta de 2040, deixando a

tecnologia a gás natural como principal responsável pelo aumento da mitigação das emissões do setor na última década.

Os resultados deste cenário indicam que a rota tradicional, responsável em 2020 por 70% da produção de aço no país, tem sua produção drasticamente reduzida chegando a valores próximos de 0. Este resultado indica que sítios industriais tradicionais precisariam descomissionar seus altos-fornos a carvão mineral. Como por exemplo a Companhia Siderúrgica do Atlântico, fundada em 2010 e com capacidade de produção de 20 Mt por ano,

Outro ponto que merece destaque é o papel do gás natural neste processo. Apesar de ser um combustível fóssil, o seu menor fator de emissão garante que o setor utilize essa fonte energética como uma tecnologia mitigadora em substituição ao carvão mineral. Por sua vez, a tecnologia de redução direta permitiria no longo prazo a substituição do gás natural por hidrogênio, o que garante ao gás um caráter de combustível de transição.

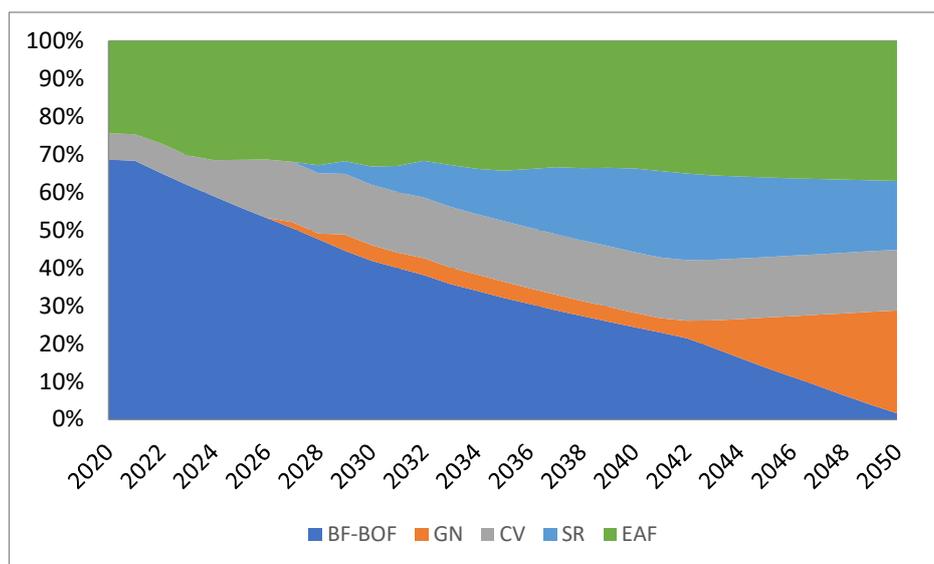


Figura 25 - Participação das tecnologias na produção de Aço entre 2020 e 2050 no Cenário B
Fonte: elaboração própria.

A matriz energética da siderurgia passa por uma profunda transformação neste cenário. As principais fontes fósseis, carvão metalúrgico e o coque de carvão mineral, que respondiam por 54% do consumo energético em 2020, em 2050 representam apenas 2% do total (Tabela 34). Esta queda está ligada a redução da produção através da rota BF-BOF a carvão mineral, tecnologia com maior intensidade de carbono e predominante até o final da década de 2020.

Em contrapartida, fontes renováveis tem sua participação aumentada. O uso carvão vegetal cresce 260% puxado pelas tecnologias tradicionais e pela fusão redutora. Já a eletricidade tem um aumento mais modesto devido a restrições na oferta de sucata, que limita uma utilização da tecnologia de forno a arco elétrico.

Por fim, o aumento do uso de redução direta a gás natural puxa a demanda por este combustível fóssil. Em 2020 esta fonte respondia por apenas 7% da matriz energética do setor, passando a 34% em 2050.

Tabela 34 - Matriz energética do setor de ferro-gusa e aço entre 2020 e 2050 no Cenário B

Fontes	2020	2030	2040	2050
Carvão metalúrgico	14%	9%	5%	0%
Carvão vegetal	19%	31%	51%	50%
Coque de carvão mineral	42%	29%	17%	2%
Eletricidade	10%	12%	11%	13%
GLP	0%	0%	0%	0%
Gás cidade	7%	4%	3%	0%
Gás natural	7%	13%	11%	34%
Óleo combustível	0%	0%	0%	0%
Óleo diesel	0%	0%	0%	0%
Outras fontes secundarias	1%	1%	1%	0%

Fonte: elaboração própria.

Cimento

A indústria de cimento possui, em linhas gerais, três medidas de mitigação possíveis: a eficiência energética e a substituição de combustíveis para as emissões de energia, e a redução da razão clínquer/cimento e a captura de carbono para as emissões de processo. A

Tabela 35 apresenta os principais indicadores dos resultados para o cenário B entre 2020 e 2050.

No curto prazo, para atingir os níveis de emissões estabelecidos pela premissa do cenário, o setor apresenta um incremento significativo da utilização de combustíveis alternativos (resíduos) como principal forma de reduzir suas emissões. Já em 2030 esta medida de mitigação atinge o seu potencial máximo de 80%. Outra tecnologia utilizada na primeira década é a redução da razão clínquer/cimento, atingindo o valor de 0,59 em 2030.

Entre 2030 e 2040, como ainda há margem para aumentar as adições ao cimento. Entretanto, ela atinge o seu limite de 0,52 sendo necessário que outras tecnologias atuem para trazer maiores ganhos de redução. Neste sentido, há a implementação de medidas de eficiência energética que contribuem para redução da intensidade no uso de energia do setor, diminuindo em 15% o valor este indicador (3,95 vs 3,40 GJ/ t clínquer).

Diferentemente do cenário A, aqui a captura de carbono se torna mais relevante. Frente as poucas opções para reduzir as emissões de processo, para atingir as restrições de emissões até 2040, CCS é utilizado por 30% das plantas de cimento. E até 2050, a captura de carbono ganha ainda mais relevância atingindo 67%.

Tabela 35 - Indicadores da indústria de cimento entre 2020 e 2050 no Cenário B

Indicador	2020	2030	2040	2050
Clínquer/Cimento	0,64	0,59	0,52	0,52
Intensidade energética (GJ/t clínquer)	4,27	3,97	3,40	3,42
Eficiência (GJ/t clínquer)	0	0	1,4	1,2
% combustíveis alternativos	0	80%	80%	80%
CCS	0%	0%	30%	67%

Fonte: elaboração própria.

O perfil energético do setor se comporta de forma similar ao apresentado no cenário A (Figura 26). Uma das principais diferenças está na utilização dos combustíveis alternativos, como resíduos urbanos e agrícolas, introduzidos antecipadamente. O consumo de gás natural possui um leve aumento entre 2020 e 2030 puxado pelo crescimento do nível de atividade do

setor, mas este valor permanece quase constante nas décadas seguintes. O consumo energético entre 2030 e 2040 não apresenta maiores variações devido ao aumento do uso das tecnologias de eficiência energética neste período. No último período da análise, o consumo energético apresenta um crescimento de aproximadamente 20%, isto ocorre pois o aumento da demanda por cimento puxa a demanda por energia do setor.

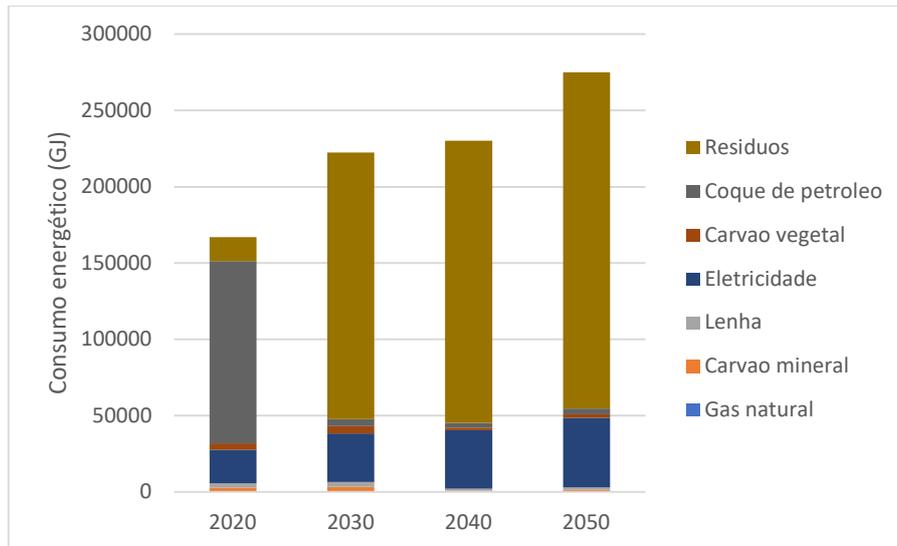


Figura 26 - Cenário B: Consumo energético da indústria de cimento
Fonte: elaboração própria.

Química

No cenário B, apresentou menor consumo energético no curto prazo em relação ao cenário A, sendo cerca de 13% inferior em 2030 (Figura 30). Entretanto, no longo prazo, os valores da demanda de energia do setor tendem a ficar próximos, sendo 448 PJ para o cenário A e 446 para o cenário B. De forma análoga ao cenário A, o aumento da demanda energética é suprido por fontes como carvão vegetal e eletricidade, sendo a segunda em maior proporção, que cresceu cerca de 280% entre 2020 e 2050.

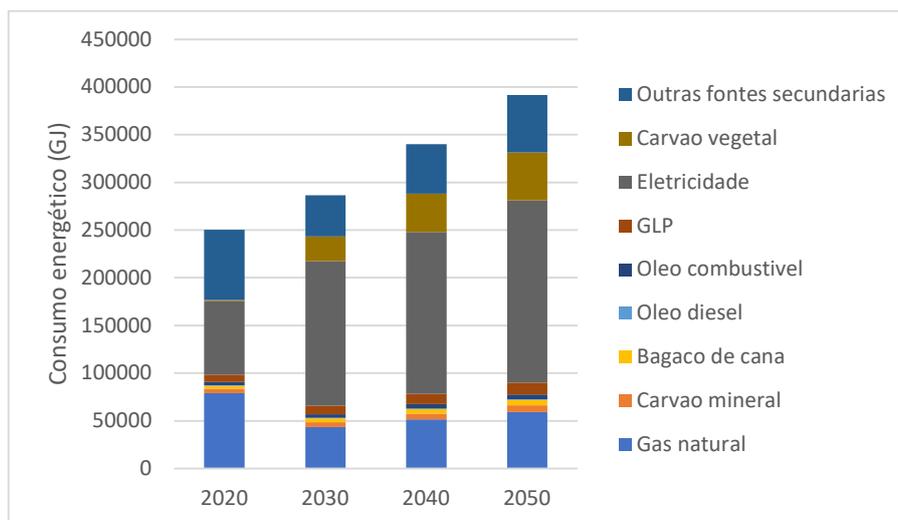


Figura 27 - Consumo energético da indústria química entre 2020 e 2050 no Cenário B
 Fonte: elaboração própria.

Neste cenário, as exigências maiores de redução das emissões ampliaram o leque de tecnologias utilizadas pelo setor para atingir suas metas (Figura 28). Já no primeiro período três tecnologias para redução das emissões de processo passam a ser inseridas, junto com medidas de eficiência energética, que atinge seu limite em 2030.

No segundo período, em função do aumento da difusão das tecnologias inovadoras há uma grande expansão da produção de tecnologias de baixo carbono para produção de amônia e etileno. Para a primeira, diferentemente do cenário A, as maiores necessidades de descarbonização levam ao aparecimento das duas tecnologias mapeadas para produção de amônia, tanto o hidrogênio verde quanto a produção com gaseificação de biomassa, sendo a primeira com maior penetração em função dos custos menores. Outra tecnologia que se destaca é a produção de bioetileno, cujo percentual de produção atinge valores próximos a 100% em 2050.

A tecnologia CCS também é utilizada neste cenário, porém, diferentemente do Cenário A, ela apresenta penetração maior. No Cenário A, o maior valor era de 3% em 2050. Já no Cenário B a captura e armazenamento de carbono atinge um valor dez vezes maior, de 30% em 2050.

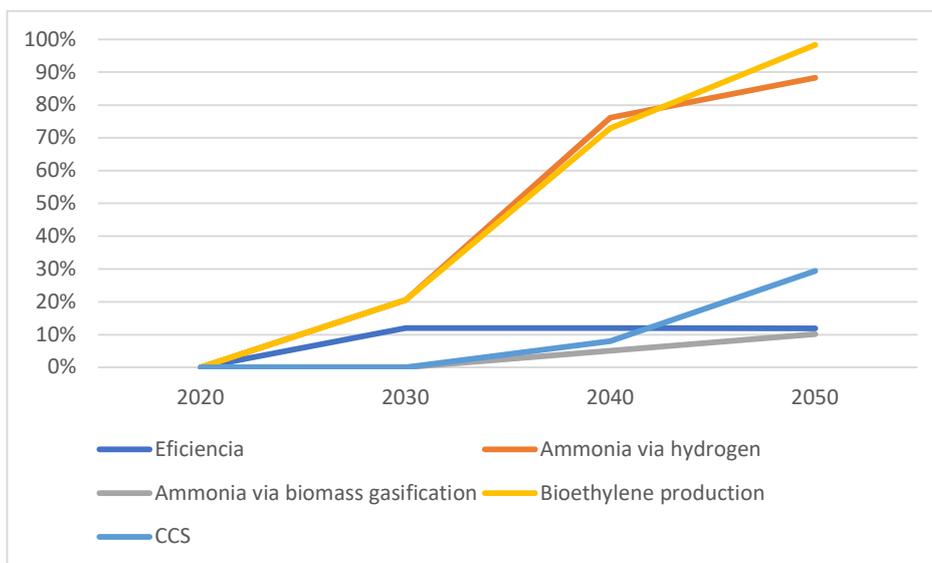


Figura 28 - Penetração das tecnologias na indústria química entre 2020 e 2050 no Cenário B
 Fonte: elaboração própria.

Demais segmentos industriais

Como mencionado, os resultados relativos aos demais segmentos industriais são visando uma apresentação sintética, uma vez que a estrutura de suas modelagens segue o mesmo padrão. Para isso, o perfil energético dos segmentos é apresentado, seguidos pelos indicadores de eficiência energética, e as duas principais medidas de mitigação aplicadas a estes segmentos industriais.

Um dos indicadores relevantes para entender o caminho da descarbonização traçado para os demais segmentos industriais está no percentual de fontes renováveis, uma das principais medidas de mitigação (Tabela 36). Em linhas gerais, no cenário B houve maior participação das fontes não-fósseis, cujos valores ficaram entre 85% e 100%.

O setor de alimentos e bebidas, que já possuía um elevado índice de fontes renováveis na sua matriz, com 94% em 2020, apresentou uma expansão até 2050 atingindo 100% da sua matriz sendo suprida por fontes renováveis como carvão vegetal, bagaço de cana e eletricidade.

A indústria de Papel e Celulose, similar à de alimentos, também já possui um alto índice de fontes renováveis graças ao uso de seus resíduos na geração de energia. Hoje, com

aproximadamente 88% da demanda atendida por fontes renováveis, o setor chega a 99% em 2050.

O setor de cerâmica, que tem 58% de fontes renováveis em sua matriz, apresentou um acentuado crescimento da utilização de biomassa com uma estabilização do consumo de eletricidade. Em 2050, as fontes renováveis representaram 91% de sua matriz energética.

A indústria de mineração, em 2020, apenas possuía eletricidade como fonte não fóssil, utilizada principalmente em serviços energéticos de força motriz. Até 2050 o setor apresentou uma expansão do uso de eletricidade, substituindo outros combustíveis como diesel na força motriz, e de biomassa, utilizada na geração de calor de processo e aquecimento direto. Neste último ano, o percentual de fontes renováveis do setor atingiu um nível 70% superior ao de 2020.

A produção de metais não-ferrosos se comportou de forma similar à da mineração. Com uma forte expansão do uso de eletricidade e biomassa, sendo a primeira o principal vetor da descarbonização da geração de calor pelo setor. O setor passa de 46%, em 2020, para 91% no uso de fontes não fósseis em sua matriz.

A indústria têxtil já possui a maior parte da sua matriz energética suprida por fontes não fósseis, com o consumo de eletricidade respondendo por um terço do total. A necessidade de redução das emissões aplicadas ao setor resultou na expansão, principalmente, do consumo de biomassa como fonte de energia. Antes 7%, em 2050 fontes de biomassa como o carvão vegetal passa a representar 21% da demanda da indústria têxtil e somadas à eletricidade, totalizam 93% da demanda energética.

Por fim, as outras indústrias também se caracterizam pelo uso de fontes não-fósseis atualmente, com quase 80% de fontes renováveis na sua matriz. No Cenário B, as limitações de emissão impostas resultaram neste segmento em uma expansão apenas das fontes de biomassa, que representavam 13% em 2020, chegando a 32% em 2050, enquanto a eletricidade permanece no patamar de 65% em todo o período.

Tabela 36 - Cenário B: percentuais das fontes renováveis nos demais segmentos industriais

Setor	Fonte	2020	2030	2040	2050
Alimentos	Biomassa	84%	86%	89%	88%
	Eletricidade	10%	10%	10%	12%
Papel	Biomassa	73%	77%	81%	83%
	Eletricidade	15%	16%	16%	16%
Cerâmica	Biomassa	50%	66%	78%	84%
	Eletricidade	8%	8%	7%	7%
Mineração	Biomassa	0%	9%	16%	22%
	Eletricidade	50%	57%	61%	63%
Não-ferrosos	Biomassa	0%	10%	15%	16%
	Eletricidade	46%	57%	64%	75%
Ferroligas	Biomassa	40%	45%	51%	55%
	Eletricidade	43%	45%	45%	45%
Textil	Biomassa	7%	13%	18%	21%
	Eletricidade	65%	68%	70%	72%
Outras indústrias	Biomassa	13%	20%	27%	32%
	Eletricidade	65%	65%	64%	64%

Fonte: elaboração própria.

A Figura 29 apresenta os ganhos de eficiência energética ao longo do período estudado para os segmentos industriais estudados, exceto aço, química e cimento, abordados anteriormente. Em linhas gerais o aumento da eficiência ficou entre 0 e 10% para os demais segmentos industriais, com destaque para o setor de mineração e não-ferrosos, com valores de 5% e 9,8%, enquanto os outros estiveram entre 0 e 2%. Os baixos ganhos de eficiência dos segmentos industriais indicam que, para estes segmentos, a redução das emissões através da substituição de combustíveis por fontes renováveis é mais custo efetiva.

A indústria de metais não-ferrosos possui emissões tanto de processo quanto emissões da queima de combustíveis fósseis. Considerando a dificuldade de reduzir as emissões de

processo pela menor quantidade de opções de mitigação, as emissões de energia sofrem uma pressão maior para serem vetor da descarbonização do setor, demandando não só a substituição por fontes renováveis quanto por ganhos de eficiência.

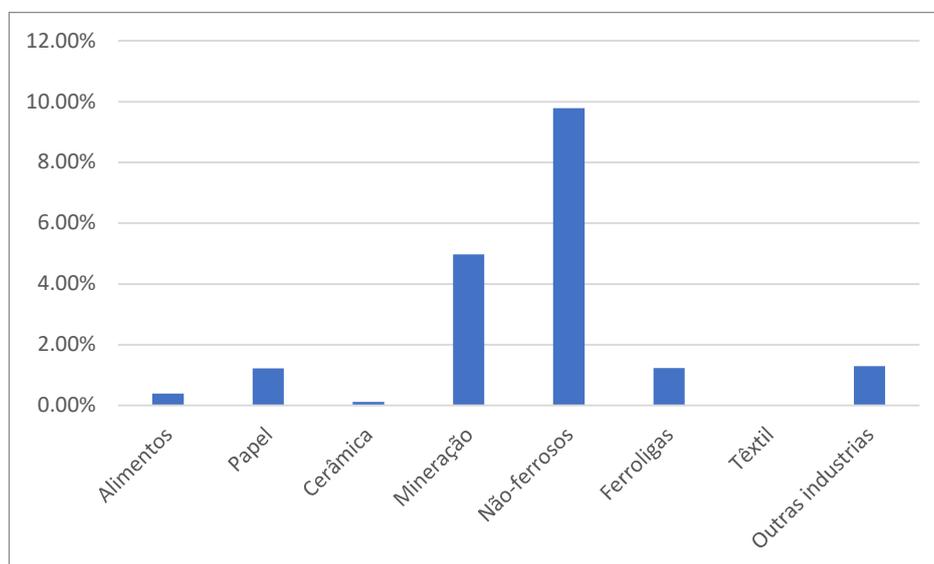


Figura 29 - Ganhos acumulados de eficiência energética entre 2020 e 2050 no Cenário B

Fonte: elaboração própria.

Outro indicador relevante para analisar o comportamento do consumo energético dos diversos segmentos industriais é o consumo específico. Na Figura 30 eles são apresentados considerando o índice de 100 no primeiro ano para ter uma visão geral e comparativa entre as indústrias. O comportamento desse indicador é explicado por duas variáveis principais: à implementação de medidas de eficiência energética e a substituição de combustíveis fósseis por renováveis, que podem ou não serem mais eficientes.

Apenas três segmentos tiveram redução no consumo específico ao longo do período: (i) mineração, (ii) ferroligas e (iii) papel e celulose. A queda do consumo específico puxado pelos ganhos de eficiência energética e pelo aumento do uso de eletricidade na sua matriz energética, que possui maior eficiência quando comparado com fontes como ‘Outras secundárias de petróleo’. Um destaque fica para o setor de mineração, que apresentou maior redução do consumo específico, fruto da implementação de medidas de eficiência energética que reduziram cerca de 5% do seu consumo de energia.

O setor de metais não ferrosos apresentou redução do consumo específico no curto prazo, puxada pela implementação de medidas de eficiência energética e a expansão do uso

da tecnologia Prebake, com consumo específico inferior ao da rota Soderberg. Entretanto, chegando ao limite técnico da eficiência energética, a mitigação das emissões é puxada pela substituição das fontes fósseis como Gás Natural e Óleo Combustível por eletricidade e biomassa.

A indústria de Cerâmica e as “Outras indústrias” apresentaram maior crescimento no consumo específico entre 2020 e 2050. As duas são caracterizadas por uma grande expansão do uso de biomassa como fonte energética substituta aos combustíveis fósseis, em especial o Gás Natural cuja participação nos segmentos é de 30% em cerâmica e 10% nas “Outras indústrias” e é um dos combustíveis fósseis de maior eficiência energética.

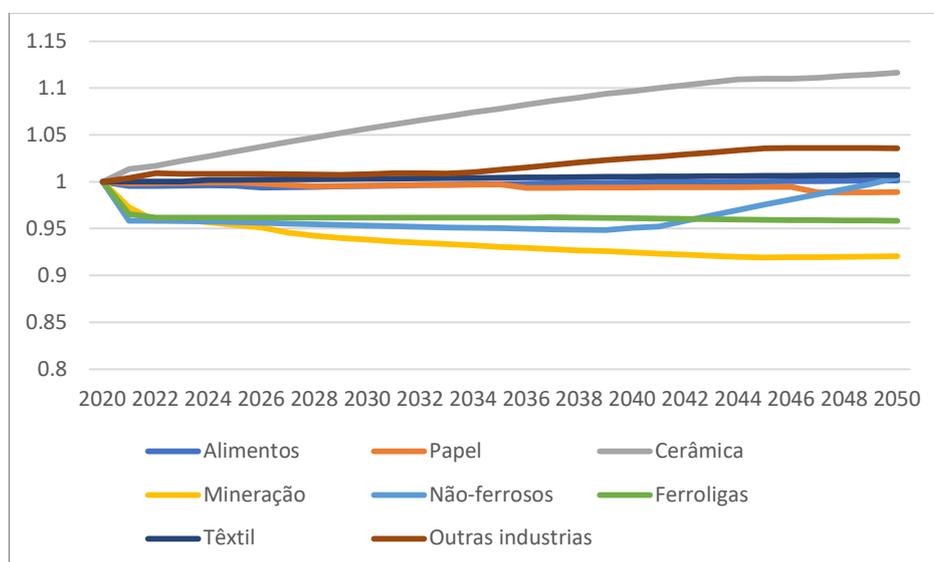


Figura 30 - Cenário B: Consumo específico dos demais segmentos industriais
Fonte: elaboração própria.

6.3.3. Custos de mitigação

Os custos marginais de abatimento do Cenário B são apresentados na Tabela 37 dividido nas três décadas até 2050. Apesar das maiores exigências de redução de emissões, custos negativos ainda são presentes em três dos onze segmentos industriais analisados. Entretanto, os custos são superiores aos encontrados pelo primeiro cenário de mitigação.

Começando pelos segmentos mais relevantes em termos de emissão, a siderurgia apresentou um custo marginal de abatimento negativo no primeiro e segundo intervalo. Isto ocorre pelo uso de tecnologias já maduras e disponíveis no mercado como a rota EAF e BF-

BOF com carvão vegetal. Os custos passam a ficar positivos quando são necessárias tecnologias de mitigação inovadoras como a fusão redutora e a redução direta a gás natural. Entretanto, comparado com outros segmentos intensivos em energia, a indústria do aço possui custos menores.

A indústria de cimento apresentou custos maiores que zero em todo período de análise. No primeiro intervalo as medidas de mitigação se concentraram na substituição do coque de petróleo pelas fontes alternativas e a redução de clínquer no cimento, ambas tecnologias necessitando de baixo custo de investimento e já disponíveis no mercado. Os custos crescem ao longo da implementação de outras tecnologias de eficiência energética, como o aumento do número de estágios na pré-calcinação, e da captura de carbono que está presente a partir de meados da década de 2030 e chega a ser responsável por dois terços da redução das emissões em 2050. Esse conjunto de fatores torna a indústria cimenteira como uma das mais caras para abatimento de emissões de GEE, em termos de custo marginal.

Terceiro setor mais importante das emissões industriais brasileiras, a indústria química apresenta um dos maiores custos de mitigação dentre os segmentos industriais. No primeiro período possui o custo de 59 \$/tCO_{2e}, sendo o mais caro em comparação com os demais. O que justifica esse valor é a necessidade de implementar medidas de eficiência energética mais caras em função da dificuldade de reduzir as emissões de processo. As opções de mitigação que permitiriam reduzir as emissões de amônia e etileno ainda se encontram em estágios prematuros de desenvolvimento, não sendo possível uma grande inserção no curto prazo. Nas décadas seguintes, caracterizadas pela utilização das tecnologias inovadoras como bioetileno e captura de carbono, os custos de mitigação dobram no período 2030-2040 chegando a 123 \$/tCO₂ no último intervalo.

A indústria que apresentou um dos maiores custos marginais de abatimento foi a de metais não-ferrosos, que comporta a produção de alumínio. O setor, que já é intensivo no uso de eletricidade, substitui o seu uso de carvão mineral tanto por eletricidade quanto por carvão vegetal, aumentando ainda mais os custos de produção. Além disso, por possuir emissões proveniente de emissões de processo, com poucas opções de mitigação, a pressão sobre a redução das emissões de GEE recai sobre o consumo energético.

As indústrias de Alimentos e Papel ainda apresentam custos negativos, apesar de serem superiores aos verificados no Cenário A. O setor se beneficia pela simplicidade das fontes de emissão, provenientes apenas dos consumos de energia. O fator que torna estes custos marginais mais caros que os do primeiro cenário é a maior utilização de eletricidade. O custo da energia elétrica é superior aos das demais opções de baixo carbono, como lenha e carvão vegetal.

Em linhas gerais, os segmentos não intensivos em energia apresentaram custos menores de mitigação. Esse resultado está ligado a facilidade do setor em reduzir suas emissões de GEE tanto através da implementação de medidas de eficiência energética como a utilização de fontes renováveis de energia.

Olhando para o setor como um todo, o custo marginal de abatimento no primeiro intervalo ainda apresenta valor negativo (-13 \$/tCO_{2e}). Já no segundo período ele sobe para 20 \$/tCO_{2e} chegando a 46 \$/tCO_{2e} no último intervalo temporal da análise.

Tabela 37 - Cenário B: custos marginais de abatimento entre 2020 e 2050 por década

Setor	2021-2030	2031-2040	2041-2050
Aço	-41	-1	14
Cimento	0	19	64
Química	59	114	123
Alimentos	-143	-95	-57
Papel e celulose	-151	-113	-96
Cerâmica	22	16	16
Mineração	-95	-31	2
Não-ferrosos	14	71	121
Ferroligas	-69	-9	3
Têxtil	-24	28	42
Outras indústrias	-62	-20	-4
Total	-13	20	46

Fonte: elaboração própria.

A Figura 31 traz os custos marginais de abatimento dispostos com a quantidade de GEE abatida nas respectivas indústrias no intervalo entre 2041 e 2050. Neste cenário, cerca de 10% das emissões abatidas ainda se encontram na faixa de custo abaixo de 0 \$/tCO₂e. Entretanto, apesar da maior parte da quantidade abatida possuir valores positivos, 80% possuem custos inferiores a 100 \$/tCO₂e. A indústria de Aço, Cimento e Química respondem por um total de 75% das emissões abatidas neste período.

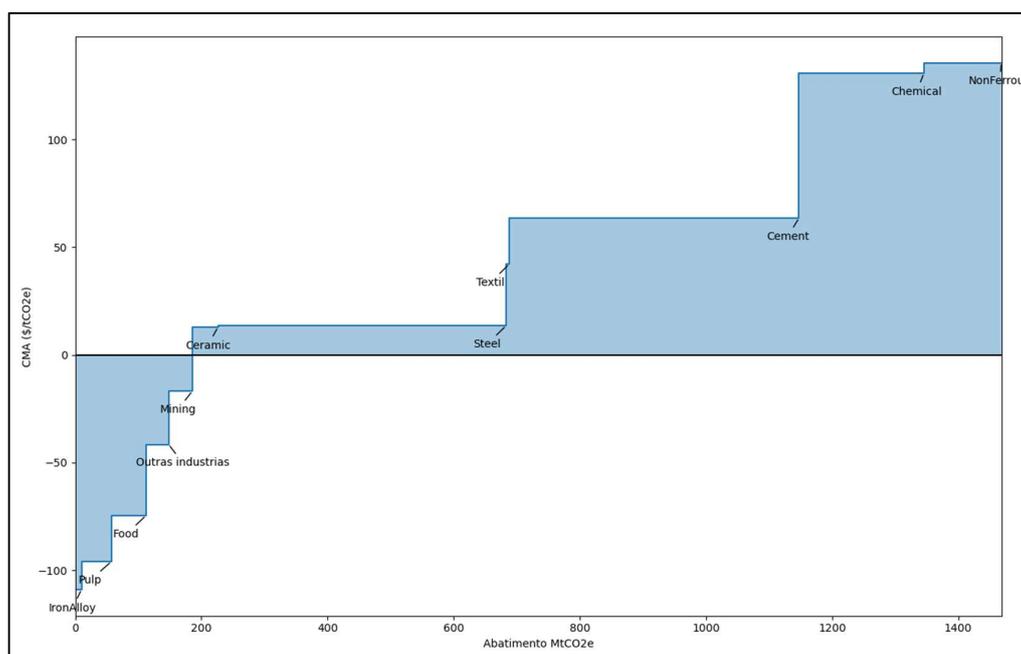


Figura 31 - Curva de Custo Marginal de Abatimento do Cenário B no período 2041-2050

Fonte: elaboração própria.

6.4. Indicadores dos cenários

A fim de compilar os resultados, nesta seção serão abordados os principais indicadores ligados aos cenários desenhados neste trabalho. O objetivo de apresentá-los é facilitar a interpretação dos diferentes caminhos que a indústria brasileira poderá percorrer frente às premissas que foram apresentadas. Estes indicadores podem ser utilizados como referências para políticas de *benchmark* ligadas ao conteúdo de carbono e a eficiência dos segmentos.

O primeiro indicador de referência são as emissões em termos absolutos (Tabela 38). A quantidade total de GEE emitida por cenário foi definido como premissa de entrada para

o modelo utilizando o ano de 2020 como base, onde o cenário de referência não apresentaria mudança na sua estrutura, o cenário A estaria limitado as emissões do ano base e o cenário B teria uma redução de 50% nas emissões em relação ao ano base. Ao olharmos para o cenário de referência, podemos ver qual seria o esforço necessário para a indústria a fim de atingir as metas estabelecidas. No cenário A o setor teria que reduzir 45% das suas emissões até 2050 em relação ao cenário de Referência. Já o cenário B necessitaria reduzir em 35% até 2030, 57% em 2040 e 72% em 2050 também em relação ao cenário de referência.

Tabela 38 - Emissões absolutas por cenário entre 2020 e 2050

Cenário	Emissões (MtCO ₂ e)			
	2020	2030	2040	2050
Referência		165	195	227
A	127	127	127	127
B		106	85	63

Fonte: elaboração própria.

Um indicador que pode ser utilizado para analisar a descarbonização da indústria como um todo é a intensidade das emissões por valor adicionado (Tabela 39). Este indicador é influenciado não só pelas medidas de mitigação que são utilizadas pelo setor industrial, mas também pelas taxas de crescimento dos segmentos industriais. Em outras palavras, segmentos menos intensivos em carbono como alimentos e têxtil crescendo a taxas maiores que segmentos intensivos, como a siderurgia, resultam em uma diminuição da intensidade do setor industrial como um todo (por efeito da variação de sua estrutura). Entretanto, o indicador geral para a Indústria é uma forma de agregar todos os diversos segmentos e ter uma visão geral sobre o comportamento do setor industrial. No cenário de referência, houve uma pequena diminuição da intensidade entre 2020 e 2050, saindo de 107 tCO₂e/ milhões de reais para 106. No Cenário A, onde as emissões são limitadas ao valor do ano base (2020), é possível notar uma queda de 45% da redução da intensidade de emissões do setor industrial. Já o Cenário B, as emissões na intensidade do setor caem 72% no período analisado.

Com este indicador é possível auxiliar na elaboração de metas de redução de emissões para o setor industrial. Um exemplo disso é a política “Nova Indústria Brasil”, lançada em

2024 pelo governo. Ela dispõe de 300 bilhões de reais para financiar o desenvolvimento da indústria brasileira e estabelece um conjunto de metas (BRASIL, 2024). Dentre elas, uma meta de redução da intensidade de emissões do setor industrial em 30% até 2033, ou seja, atingir a intensidade de 75 tCO₂e/milhões de reais. Pegando como referência os resultados desta tese, no cenário A, esta meta só seria atingida em 2036. Já no Cenário B, esta meta já é alcançada em 2029, dentro do prazo estabelecido pelo governo.

Isto indica que para que a indústria brasileira atinja o alvo de 75 tCO₂e/milhões de reais é necessário esforços maiores do que limitar o nível de emissões da indústria. Mas não são tão elevados quantos os níveis de redução de emissões definidos no cenário B. Neste sentido, os resultados encontrados nesta tese podem auxiliar o setor industrial e o governo indicando quais possíveis caminhos para atingir as metas estabelecidas pelo governo.

Também é importante destacar que este indicador é formado pelas emissões tanto das indústrias intensivas em carbono quanto das indústrias leves. Sendo assim, a intensidade de emissões poderá ser alterada em função do crescimento de cada um dos segmentos industriais.

Tabela 39 - Intensidade das emissões da indústria (tCO₂e/ milhões de reais)

Cenário	Intensidade (tCO ₂ e/milhões de reais)			
	2020	2030	2040	2050
Referência	107	110	105	106
A	107	84	68	59
B	107	71	46	30

Fonte: elaboração própria.

A Tabela 40 apresenta o consumo energético por cenário entre 2020 e 2050. Em linhas gerais, apesar das diferentes metas de redução de emissões, os três cenários mantiveram um consumo energético próximo. Isto ocorre, pois a substituição de combustíveis é uma das medidas de mitigação mais utilizada pelo setor industrial. Pequenas diferenças entre os cenários é mais impactada pelo tipo de combustível substituído e sua quantidade. Como as fontes de biomassa possuem menor eficiência que as fontes fósseis como gás natural, sua substituição implica maior consumo energético. Isto pode ser visto no

cenário A, que apresentou um consumo energético ligeiramente maior em 2050 do que o cenário de referência. Já o cenário B, a quantidade de energia demandada é praticamente igual do valor do cenário sem restrição de emissão.

Tabela 40 - Consumo energético por cenário entre 2020 e 2050

Cenários	Consumo energético (PJ)			
	2020	2030	2040	2050
Referência	3,425	4,154	4,922	5,615
A	3,425	4,103	4,874	5,625
B	3,425	4,075	4,864	5,612

Fonte: elaboração própria.

Um indicador relevante para o setor é o percentual de fontes renováveis na sua matriz energética (Tabela 41). No cenário de Referência, como não houve mudança na estrutura da produção industrial, o percentual de renováveis permaneceu praticamente constante no período. Como mencionado na seção que trata dos resultados do Cenário Referência, sua única variação está relacionada com as diferentes taxas de crescimento dos segmentos industriais. Os cenários de mitigação, A e B, possuem um salto na década até 2030, passando de 66% para 74% e 79%, respectivamente. E no fim do período, ambos possuem mais de 80% de fontes renováveis na matriz energética industrial, sendo o cenário B, com 89% e 82% no cenário A.

Este resultado indica que a descarbonização da indústria brasileira passa por uma forte expansão das fontes renováveis no setor. O que pode parecer um grande desafio, entretanto, diversos segmentos industriais já possuem elevado percentual do uso de biomassa e eletricidade, como alimentos e papel. Isto também só é possível graças a matriz elétrica altamente renovável do país, que permite a utilização de eletricidade como fonte de calor ou de força motriz para reduzir as emissões da indústria.

Tabela 41 - Percentual de fontes renováveis nos diferentes cenários entre 2020 e 2050

Cenário	2020	2030	2040	2050
Referência	66%	65%	65%	66%
A	66%	74%	79%	82%
B	66%	79%	86%	89%

Fonte: elaboração própria.

Por fim, a Tabela 42 apresenta os custos marginais de abatimento em cada um dos cenários para o setor industrial. Ambos os cenários tiveram custos de mitigação negativos no primeiro período de análise. Na segunda década, o cenário B atinge o nível de 20 \$/tCO_{2e}, enquanto o cenário A ainda se encontra na faixa de valores abaixo de zero. Por fim, no último período, os dois cenários se encontram com valores positivos, entretanto, o valor do cenário A, que limita as emissões ao mesmo nível de 2020, possui custo ainda próximo de zero, enquanto o cenário que apresenta as maiores reduções de emissões chega ao valor de 46 \$/tCO_{2e}. Importante ressaltar que todos os cenários analisados ainda possuem custo marginal de abatimento inferior a preços como aqueles praticados atualmente na Europa (EUROPEAN COMMISSION, 2023b).

Tabela 42 – Custo marginal de abatimento por cenário de mitigação entre 2030 e 2050.

Cenário	CMA (\$/tCO _{2e})		
	2021-2030	2031-2040	2041-2050
A	-36	-11	1
B	-13	20	46

Fonte: elaboração própria.

6.5. Barreiras, instrumentos e oportunidades da descarbonização industrial

O processo de transição da indústria brasileira para uma produção de baixa intensidade de carbono exigirá a superação de alguns desafios que transcendem o arcabouço algébrico do modelo desenvolvido nesta tese. Entretanto, à luz dos resultados encontrados, pode-se identificar as barreiras que o setor enfrentará para atingir seus compromissos climáticos, os instrumentos para superá-los e as oportunidades que se apresentam para o país na transição para uma economia de baixo carbono.

6.5.1. Barreiras

Os desafios abordados nesta seção focam nas esferas (i) econômicas e financeiras, (ii) regulatórias, (iii) tecnológicas e (iv) culturais. Estes quatro grupos servem para sintetizar todo o conjunto de obstáculos que o setor enfrenta e enfrentará nesse processo de descarbonização. As barreiras foram mapeadas em função das tecnologias e recursos identificados através desta tese, agrupadas na forma de (i) eficiência energética (ii) substituição de combustíveis e matérias primas e (iii) processos inovadores.

Eficiência energética

Utilizar medidas de eficiência energética é prática almejada pelo setor industrial uma vez que reduz os custos com combustíveis. Entretanto, mesmo sendo custo efetiva, há diversas razões pelas quais estas medidas não são difundidas de forma análoga aos resultados dos modelos matemáticos. Algumas destas medidas possuem elevado custo de investimento, desencadeando uma série de outras barreiras financeiras o que dificultam a sua difusão (LA ROVERE; GROTTA; WILLS, 2018). [Clique ou toque aqui para inserir o texto.](#)

Em primeiro lugar, não é simples estimar a economia de energia gerada por uma medida de eficiência energética e os custos finais que esta medida trará ao longo da vida útil do projeto (CARLANDER; THOLLANDER, 2023). Estudos de viabilidade de projetos de eficiência podem subestimar o custo da gestão da energia e os custos de investimento do projeto. Somado a isso, há também a possibilidade de superestimar a economia de energia gerada pela implementação da tecnologia (CAGNO et al., 2013).

Os investimentos nas tecnologias mais eficientes ou de baixo carbono possuem elevado custo e necessitam de financiamentos. Neste quesito, as empresas enfrentam o primeiro desafio ligado ao acesso e ao custo do crédito. A altas taxas de juros e o *spread* de juros⁹ é uma das maiores barreiras em relação ao financiamento de investimentos para empresas do setor industrial (CNI, 2012, 2019, 2023a), tanto para crédito de curto quanto de longo prazo. Essa barreira ganha destaque no Brasil, uma vez que o país possui uma das

⁹ O *spread* se refere a diferença entre os custos de captação de um recurso feito pelo banco e o custo para o empréstimo aos seus clientes.

maiores taxas de juros do mundo (THE WORLD BANK, 2023). Atualmente, a taxa Selic¹⁰, referência para a taxa de juros, está em 10,50% ao ano (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2024a). Entretanto, a expectativa do mercado é de que nos próximos anos haja uma redução desta taxa fruto da desaceleração da inflação (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2024b).

Apesar do acesso ao crédito poder ser uma barreira menor para empresas grandes, para as pequenas e médias empresas, ela se torna mais relevante (SOKI, 2019). O setor industrial brasileiro é formado por uma maioria de pequenas e médias empresas (CNI, 2023b) que respondem por um terço do valor adicionado deste setor (SEBRAE; FGV, 2020). As empresas das indústrias energointensivas são aquelas que deverão ser mais impactadas pelas metas de redução de emissões e uma precificação de carbono. Entretanto, o esforço para descarbonização recairá também sobre diversos segmentos da indústria, como cerâmica e têxtil, formados por empresas de menor porte. Nesse sentido somam-se as barreiras financeiras, os custos de transação para projetos de pequeno e médio porte, como caldeiras e medidas de eficiência energética, que podem ser elevados, com um impacto maior quanto menor for a empresa.

Outro aspecto ligado a questões econômicas e financeiras que dificultam os investimentos é a competição interna de projetos dentro de uma própria empresa (CAGNO et al., 2013; CAGNO; TRIANNI, 2014; U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2015). Dentro de um plano de investimento de uma companhia não há espaço para todos os projetos. No processo de tomada de decisão para a escolha destes investimentos, as companhias aprovarão aqueles que trarão menor retorno no menor prazo. Tecnologias de eficiência energética por vezes apresentam tempo de *payback* maiores que cinco a sete anos, considerados longos (GICC, 2023). Desta maneira, estes projetos terão pouca perspectiva de serem implementados sem que haja nenhum outro incentivo.

Outro aspecto que reduz a atratividade das medidas de eficiência energética na indústria está ligado à importância do custo de energia em cada segmento. Os custos de energia para algumas indústrias não são tão representativos comparados com os demais

¹⁰ Taxa de juros básica da economia. É a taxa de juros média praticada nas operações dos títulos públicos federais

custos de produção. Desta forma, as economias geradas pelas tecnologias de eficiência energética não trazem reduções de custo de produção significativas (UNIDO, 2011).

Os custos de transação se conectam com a necessidade da elaboração de estudos técnicos e financeiros para a implementação de uma medida. Para elaborá-los, é necessário corpo técnico especializado, e para empresas de menor tamanho pode não haver esta disponibilidade, além de representarem custos mais significativos. Nesse sentido, outra barreira a ser superada pelo setor é a falta de mão de obra especializada. Isto também dificulta no mapeamento das oportunidades de eficiência energética para as indústrias.

A falta de padrões de eficiência energética para bens de capital, como caldeiras, constitui uma barreira para a implementação de modelos mais eficientes. Atualmente no Brasil há apenas programas que focam em um conjunto limitado de equipamentos: o Procel, que foca em equipamentos consumidores de energia elétrica (PROCEL, 2006); e o Conpet, que visa o aumento da eficiência energética em fogões, aquecedores e carros (INMETRO, 2021). Não havendo um padrão similar para equipamentos de uso industrial consumidores de combustíveis fósseis, isso dificulta a disseminação de opções mais eficientes.

Ainda existem barreiras relacionadas com os riscos para adoção de tecnologias mais eficientes energeticamente. Existem riscos externos que estão ligados ao preço da energia e mudanças nas políticas públicas. Uma medida que reduz o consumo de eletricidade pode ter seu benefício reduzido caso o preço futuro desta fonte se torne menor. Há riscos técnicos, diretamente relacionados com a performance das tecnologias. A incorporação de uma medida envolve um processo de aprendizagem. As incertezas sobre como este processo irá se desenvolver e se traduzir em ganhos de eficiência, gera um aumento de risco sobre a implementação da tecnologia.

Existem também barreiras ligadas a aspectos comportamentais dentro da indústria, como por exemplo a inércia de transformar um determinado processo adotando medidas mais eficientes. Neste sentido, todos os elementos de risco supracitados corroboram para que o setor mantenha um equipamento cujos custos de investimentos já foram pagos e prolongar a sua vida útil, dificulta o aumento da eficiência no setor.

Substituição de combustíveis e matéria prima

A substituição de uma fonte fóssil por outra renovável pode esbarrar em outros desafios para além do custo de investimento e dos custos dos combustíveis. Nesta tese, optou-se por fazer uma abordagem de preços estática e com custos únicos para todos os setores. Entretanto, o Brasil é um país de dimensões continentais onde cada região possui características específicas, preços de combustíveis e acesso a recursos energéticos distintos. Olhando com mais cautela para os pormenores destes elementos, podemos identificar as principais barreiras para substituição de fontes fósseis.

Um primeiro elemento que merece destaque é o custo da energia em si. No caso da energia elétrica, os custos de eletricidade industrial ainda são elevados no Brasil e variam de acordo com a região. Os resultados encontrados nesta tese indicam que seu uso costuma trazer um custo marginal de abatimento superior a zero. Isto indica que a adoção de uma caldeira elétrica frente a uma caldeira a gás natural resultaria em um aumento do custo de produção, o que não acontecerá sem que haja algum incentivo para a companhia. Além disso, incertezas sobre os preços da energia elétrica adicionam mais um fator de risco sobre uma possível substituição tecnológica.

Já a substituição por fontes de biomassa enfrenta outros desafios, além destes supracitados. A disponibilidade de terra para a produção de lenha e carvão vegetal não é uma das principais restrições que este recurso enfrenta, conforme apresentado por PIKETTY et al. (2009), em relação a demanda de energia do setor industrial. Em linhas gerais, o principal desafio em ampliar o uso de carvão vegetal está relacionado ao longo ciclo da cadeia de produção, em comparação com outros insumos ou investimentos. Com uma média de 7 anos, o ciclo do eucalipto no Brasil exige investimentos significativos na aquisição ou arrendamento de terras, execução e gestão de plantações, bem como em todos os aspectos associados ao uso da terra (E+ ENERGY TRANSITION INSTITUTE, 2022). Somados a isso, há desafios relacionados à previsibilidade e estabilidade do fornecimento, apesar da boa disponibilidade de áreas em todo o país.

A substituição do carvão mineral atenua as barreiras do uso das fontes renováveis. O carvão é uma das fontes fósseis mais disponíveis globalmente, e embora o Brasil não seja um grande produtor, ele é facilmente importado. Ao importar, as empresas muitas vezes podem

estabelecer contratos cambiais que permitem o pagamento após a produção e venda do produto de aço, invertendo a lógica temporal em relação ao carvão vegetal. Evidentemente, as variações nos preços, taxas de câmbio, juros e outros parâmetros financeiros afetam a atratividade econômica do coque e do carvão vegetal a curto prazo. Entretanto, os custos de transação associados ao carvão vegetal, e principalmente a necessidade de alta imobilização de capital ao longo de períodos longos, tornam as decisões de investimento mais complexas e arriscadas em comparação com o uso de coque.

Diversas outras barreiras precisam ser superadas para aumentar a participação do carvão vegetal na matriz energética da indústria brasileira. Estas incluem (i) a falta de disponibilidade de financiamento com políticas de carência e juros adequadas para o ciclo do eucalipto (de 7 a 14 anos), (ii) melhorias na infraestrutura e logística para expandir os polos de desenvolvimento florestal, (iii) prazos mais longos de licenciamento ambiental relacionados ao uso da terra, (iv) investimentos para aprimorar os processos de carbonização da madeira e explorar subprodutos, (v) engajamento em toda a cadeia de produção florestal para otimizar a disponibilidade de madeira, (vi) reduzir os custos de capital associados ao uso da terra, e (vii) uma comunicação mais eficaz sobre dados e benefícios potenciais gerados pelo setor (E+ ENERGY TRANSITION INSTITUTE, 2022).

Nos resultados para a indústria de cimento, o uso de resíduos como fonte de energia é uma das principais medidas de mitigação em ambos os cenários. Do ponto de vista legal, representantes do setor consideram que a regulamentação sobre este tipo de destinação exige um processo de licenciamento mais rigoroso, dificultando seu crescimento (CENTRO CLIMA, 2023). Apesar de haver disponibilidade para oferta desta fonte de energia, é fundamental que os resíduos urbanos e florestais serem considerados como uma alternativa na matriz energética e não como resíduos.

É importante destacar que houve avanço na regulamentação nos últimos anos relacionada aos resíduos no setor cimenteiro. O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabeleceu uma resolução em 2020 que "*dispõe sobre o licenciamento da atividade de coprocessamento de resíduos em fornos rotativos para a produção de clínquer*" (CONAMA/MMA, 2020).

Outro problema que dificulta o uso de resíduos como energia é a falta de incentivo ao uso energético. O Brasil ainda utiliza aterros sanitários e lixões para o descarte de resíduos (CETESB, 2016; IPEA, 2012; MMA, 2020). O custo de usar esses resíduos como fonte de energia é maior do que o descarte em um aterro aberto, uma vez que é necessário fazer investimento em equipamentos para tratar a matéria-prima. Isto cria dificuldades para que a destinação energética seja preferida em relação aos aterros. Além disso, empresas reclamam da ausência de incentivos do governo para o uso energético de resíduos, que não considera justa a precificação dos benefícios ambientais que sua utilização trás para a sociedade (CENTRO CLIMA, 2023).

Em relação a outras matérias-primas não energéticas, a questão da sucata ferrosa é um desafio especial para o setor siderúrgico. Como fora desenvolvido nesta tese, a modelagem considera a oferta de sucata para produção de aço em função da produção e do seu uso. Um fator que pode ser limitante para geração é a falta de incentivo a economia circular. A sucata possui os mesmos encargos tributários que qualquer outro produto, da forma que os custos da utilização deste resíduo aumentam frente a carga tributária análoga a outros produtos com maiores impactos ambientais.

Outra barreira para aumentar o uso da sucata ferrosa é a falta de política de economia reversa. A Política Nacional de Resíduos Sólidos prevê que os envolvidos no ciclo produtivo de um produto sejam responsáveis pela adoção de práticas sustentáveis e pela diminuição dos resíduos (BRASIL, 2010). Entretanto, a lei não estabelece obrigatoriedades específicas em relação a coleta de resíduos.

Para o setor siderúrgico, a utilização de tecnologia a gás natural surge como opção de mitigação relevante para trazer maior redução das emissões de gases de efeito estufa. O primeiro desafio que se coloca para o setor é o preço do gás. Os resultados desta tese indicam que a redução direta a gás natural possui custo mais elevado do que as tecnologias atualmente utilizadas. O elevado custo do gás natural no Brasil foi o responsável pelo fechamento da única planta de redução direta no país, a Usiba, nos anos 2000 (EXAME, 2011).

Outro desafio que tange o uso desta fonte é a malha de distribuição de gás natural. Antes mesmo do custo competitivo, é necessário que haja oferta de gás natural para o setor. A falta de infraestrutura de distribuição de gás natural outra barreira a ser superada pelo setor

para que esta tecnologia seja difundida. Atualmente, o Brasil conta com uma malha de 9.409 km distribuídos pelo país. Entretanto, ela se concentra pelo litoral brasileiro, do Rio Grande do Sul até o Ceará, e uma linha que conecta o gás da Bolívia (GASBOL) até São Paulo. A falta de infraestrutura que permita transportar o gás de forma mais difundida é um fator que poderá inibir o uso deste recurso energético.

Apesar de que hoje a maior parte da indústria siderúrgica se concentra na região sudeste, as reservas de ferro no norte do país podem mudar este perfil de produção. Atualmente, a malha de gás não chega nesses estados. Entretanto, a ANP já autorizou a construção de gasodutos que conectariam o GASBOL até o Pará e Maranhão. De acordo com o estudo Plano Indicativo de Gasodutos de Transporte realizado pela EPE, seriam necessários R\$ 17 bilhões em investimentos.

Os custos para expandir a malha de gás natural no país podem, por sua vez, ter impacto nos preços do combustível. Se os investimentos não tiverem mecanismos para diluir os custos ao longo da vida útil do projeto, eles podem aumentar o preço do gás natural. Como fora mencionado, o atual preço do GN já é uma barreira para a implementação da Redução Direta. Caso haja aumento em função da necessidade dos investimentos, isto poderá inviabilizar esta tecnologia no país.

Tecnologias inovadoras

As tecnologias inovadoras apresentam um conjunto de barreiras semelhantes às de eficiência energética. Esta similaridade ocorre pelo fato de que ambas medidas de mitigação necessitam, em linhas gerais, de investimentos para serem implementadas. Desta forma, o investimento em novas tecnologias implica superar os mesmos desafios financeiros supracitados: (i) competição interna por investimentos, (ii) custo do crédito e acesso ao crédito, (iii) custos de transação e (iv) alto custo de investimento.

No entanto, pode-se destacar algumas diferenças. A primeira é o alto grau de incerteza do investimento. As tecnologias inovadoras ainda não estão no seu estágio máximo de maturidade tecnológica ou estão começando neste estágio. Por exemplo, a redução direta utilizando hidrogênio ou a captura de carbono são tecnologias que ainda não foram testadas

em larga escala (MIDREX, 2019). As incertezas ligadas ao processo de desenvolvimento da maturidade destas tecnologias, torna o risco de sua adoção elevado.

Os custos das tecnologias inovadoras somam-se ao elevado grau de incerteza, resultado em um elevado risco da adoção destas tecnologias. Enquanto a implementação de uma medida de eficiência energética ou uma caldeira a biomassa está na faixa dos milhares a milhões de reais, uma planta industrial pode chegar a bilhões de reais (BATAILLE, 2020a; VALE, 2022). Na Suécia, a H2 Green Steel planeja a construção da primeira siderurgia de larga escala a partir de hidrogênio verde. Com uma capacidade de produção de 2,5 Mt de aço, o seu custo de investimento é estimado em \$5,15 bilhões (cerca de R\$ 25 bilhões na cotação atual) (REUTERS, 2024). Aqui no Brasil, a planta industrial da tecnologia TecnoRed, com capacidade de 250 kt, tem um custo de investimento de aproximadamente R\$ 1,6 bilhões (VALE, 2022).

Em um setor onde as margens de lucro são baixas, o aumento do custo de produção pode trazer impactos grandes para companhia. O risco de negócios no setor industrial já é elevado com as tecnologias tradicionais. Recentemente, as mudanças econômicas causadas após a crise de 2008 gerou prejuízos bilionários a companhia alemã ThyssenKrupp, culminando na venda seus ativos nas Américas, como a Companhia Siderúrgica do Atlântico (hoje Ternium). Na ausência de incentivos financeiros que tornem estas indústrias mais competitivas, é pouco provável que estes projetos sejam difundidos, em especial em países em desenvolvimento (BATAILLE, 2020a).

Além disso, esses investimentos em novas rotas de produção são de longo prazo, o que gera um risco de *lock in* tecnológico. Estas duas características criam uma barreira para primeiros entrantes nas novas tecnologias que não podem aceitar aumentos dos custos de produção, gerando uma dependência da infraestrutura e de recursos para a operação continuar (BACHNER et al., 2020).

Dentre as tecnologias mapeadas nesta tese, a captura e armazenamento de carbono poderá sofrer com barreiras técnicas mais específicas. Esta tecnologia exige uma vasta e complexa infraestrutura para garantir que os parques industriais tenham acesso ao escoamento e transporte do carbono capturado até as reservas. Projetos ligados a esta tecnologia podem chegar a até cinco anos para serem planejados, desenvolvidos e

implementadas. No Brasil este desafio pode ser ainda maior considerando o tamanho continental do país (BUDINIS et al., 2018).

No mais, a falta de políticas e diretrizes regulatórias sobre tecnologias como CCS se destaca como uma de suas principais barreiras. Este quadro poderá mudar nos próximos anos considerando que tramita no congresso nacional o PL 2148 de 2015 já aprovado pela comissão do Senado¹¹. Este projeto dispõe sobre “*a exploração da atividade de armazenamento permanente de dióxido de carbono de interesse público, em reservatórios geológicos ou temporários, e seu posterior reaproveitamento*” (BRASIL, 2022).

Os resultados desta tese indicam que a captura de carbono é tecnologia necessária apenas em um cenário de redução das emissões mais intenso e em apenas dois segmentos (química e cimento). Estes dois segmentos industriais se espalham pelo território brasileiro, em especial a indústria de cimento composta por dezenas de unidades produtivas. Isto agrava o desenvolvimento desta tecnologia pois necessitaria uma malha de gasodutos ampla ao longo do território nacional para abranger os sítios industriais.

Não ligada a aspectos econômicos, a falta de conhecimento técnico e pessoal especializado é uma barreira que se acentua no caso de tecnologias inovadoras. (IEA, 2023b; LIU; FAN; LI, 2016). Estudo realizado pela IEA (2023) traz resultados que indicam que a formação de pessoas especializadas não acompanha a demanda do setor de energia, o que pode gerar uma escassez de um corpo técnico especializado. Outro estudo, realizado pela Brasscom indica que haverá no Brasil um déficit de 532 mil profissionais em 2025 para atender à transição energética.

No Brasil, o corpo técnico especializado poderá ser um desafio maior frente a ‘fuga de cérebros’ que o país enfrenta (EBC, 2023; PACHECO, 2023). Estimativas do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, veiculado ao Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação indicam que o Brasil perdeu cerca de 6,7 mil cientistas nos últimos anos. Alguns dos motivos para esta migração estão relacionados com a “falta de investimentos, bolsas de pesquisa congeladas por 9 anos, corte de verba para manutenção de equipamentos”.

¹¹ O projeto de lei ainda está em tramitação até o presente momento e poderá ter seu nome alterado em etapas futuras.

Não há um mercado para produtos de baixo carbono. Os resultados nesta tese, em especial no cenário B, indicam que a produção de materiais como aço e cimento com baixo nível de emissões resultam em custos maiores de produção. Entretanto, não existe uma demanda de mercado para estes produtos, que se diferenciam daqueles produzidos a partir de carvão mineral ou coque de petróleo. Na indústria siderúrgica, por exemplo, inundada por aço chinês de baixo custo e com elevado nível de emissão, novos projetos que podem trazer aumento de custo para o setor, se torna inviável.

Um importante resultado desta pesquisa indica que a demanda por tecnologias inovadoras na descarbonização da indústria brasileira se faz necessária apenas no Cenário B, em geral. O crescimento das emissões industriais brasileiras de GEE pode ser evitado utilizando tecnologias já conhecidas pelo mercado, como redução direta a gás natural, utilização de resíduos na indústria de cimento e a substituição de combustíveis fósseis por renováveis nos demais segmentos industriais. Apesar disso, superar as barreiras às tecnologias inovadoras poderá garantir ao Brasil posição de protagonismo na transição energética e em seus compromissos climáticos, gerando inúmeras oportunidades para o país.

O Tabela 43 apresenta as barreiras financeiras, técnicas, regulatórias e culturais mencionadas nesta seção para cada um dos três grupos de medidas de mitigação abordados nesta tese.

Tabela 43 - Quadro Resumo das barreiras as medidas de mitigação para o setor industrial

Medida de mitigação	Barreira
	Acesso e custo do crédito
	Requisitos burocráticos para acesso ao crédito
	Alto risco de investimento
Eficiência energética	Concorrência com investimentos internos
	Altos custos de investimento
	Custos de transação
	Dificuldade na elaboração de estudos de viabilidade técnica e financeira
	Falta de conhecimento de novas tecnologias e processos

Substituição de combustíveis	Regulamentos sobre a utilização de resíduos/cogeração
	Falta de garantia de fornecimento de matéria-prima
	Adoção ou não de medidas mais sustentáveis não diferem muito do processo de licenciamento
Novas matérias primas e tecnologias	Resistência às mudanças nas práticas de produção
	Falta de credibilidade e conhecimento
	Logística para reciclagem
	Falta de garantia de fornecimento de matéria-prima
	Adoção ou não de medidas mais sustentáveis não diferem muito do processo de licenciamento
	Acesso e custo do crédito
	Requisitos burocráticos para acesso ao crédito
	Alto risco de investimento
	Concorrência com investimentos internos
	Altos custos de investimento
	Custos de transação
Falta de pessoal especializado	
	Falta de demanda para produtos de baixo carbono

Fonte: elaboração própria.

6.5.2. Instrumentos

Frente aos desafios apresentados na seção anterior, é necessário pensar em instrumentos para superar estas barreiras. Nesta seção é apresentado um conjunto de instrumentos que podem ser utilizados de forma a facilitar a transição para uma indústria de baixo carbono no Brasil. O objetivo destes instrumentos é impulsionar os investimentos e a inserção das diversas tecnologias inovadoras necessárias para a descarbonização da indústria brasileira.

Para superar as barreiras econômicas, é possível empregar um conjunto de instrumentos financeiros. Linhas de crédito específicas para eficiência energética no setor industrial podem representar uma ferramenta crucial (GVCES, 2016). Atualmente, existem

linhas de crédito para eficiência energética na indústria oferecidas pelo BNDES; no entanto, essas linhas de crédito geralmente abrangem mais equipamentos que consomem eletricidade do que aqueles movidos a combustíveis fósseis (BNDES, 2022).

O Brasil pode se beneficiar de estruturas já estabelecidas de financiamento, como o Fundo Clima, utilizado para financiar estudos e projetos de redução de emissões de gases de efeito estufa ou de adaptação às mudanças climáticas (BNDES, 2023). Gerido pelo BNDES e o Ministério de Meio Ambiente, ele possui nove subprogramas: (i) mobilidade urbana; (ii) Cidades sustentáveis; (iii) Máquinas e equipamentos eficientes; (iv) Energia renovável; (v) Resíduos sólidos; (vi) Carvão vegetal; (vii) Mata Nativa; (viii) Serviços e gestão de carbono; e (ix) projetos inovadores. Com a inclusão de um subsegmento focado nas tecnologias do setor industrial, este recurso poderia ser utilizado para alavancar projetos no setor.

Além disso, a diversificação de produtos financeiros é fundamental para abranger todos os tipos e formatos distintos de indústrias. Como mencionado, o setor industrial é composto por empresas de diversos portes, que possuem gerências distintas de seus investimentos e demandas específicas por financiamento.

Diretrizes uniformes para análise de crédito contribuem para reduzir os riscos e os custos do financiamento, através da padronização e simplificação do processo (CNI, 2018; GVCES, 2016). Isto pode ser obtido com a criação de guia para o setor financeiro e o setor produtivo elaborarem seus produtos com base em diretrizes pré-estabelecidas, por exemplo: (i) classificação de projetos e tecnologias; (ii) fluxo de passos a serem seguidos; (iii) procedimentos para auditoria e monitoramento do programa; (iv) requisitos pré-definidos de elegibilidade.

A desburocratização do acesso ao crédito é um instrumento que pode ser utilizado para impulsionar os investimentos, facilitando a aquisição de crédito, que afeta principalmente pequenas e médias empresas, bem como reduzindo o seu custo. Recentemente, o governo brasileiro lançou um conjunto de medidas com o objetivo de facilitar o acesso e reduzir as taxas de juros no mercado de crédito, que veio a se tornar a Lei 14.711/2023 (BRASIL, 2023a). Dentre as medidas pode-se destacar as melhorias nas emissões de debêntures para permitir que *“as séries de principal e juros sejam negociadas*

de forma separada” visando melhorar a captação de recursos (MINISTÉRIO DA FAZENDA, 2023).

Incentivar a participação das ESCOs (*Energy Services Company*) no setor industrial contribui como a disseminação de tecnologias de eficiência energética. ESCOs são empresas que entregam projetos de eficiência energética que serão financiados pelas economias de energia gerada por eles através da vida útil do projeto. Na China, as ESCOs têm papel central na promoção da eficiência energética (GLOBAL ESCO NETWORK, 2020; IEA, 2021a). Estima-se que elas contribuíram com a redução de 103 MtCO₂ por ano, gerando mais de 770 mil empregos. Para impulsionar estas empresas, o governo chinês introduziu uma série de incentivos fiscais, como redução de impostos para empresas clientes de ESCOs.

Um instrumento que pode ser utilizado para favorecer produtos de baixo carbono é a criação de selos e padrões relativos ao conteúdo de carbono, que poderá atrair consumidores interessados em reduzir a suas emissões ao longo da cadeia. No caso da eficiência energética, já existem selos relativo ao consumo de energia elétrica e combustível em equipamentos utilizados pelas famílias, como ar-condicionado, geladeira e aquecedores, por exemplo o Procel. Nesse sentido, a IEA tem buscado estabelecer definições de aço e cimento de baixo carbono. A partir de trajetórias para atingir o *net-zero*, a IEA estabeleceu intervalos de limites para o conteúdo de carbono nestes produtos industriais, qualificando-os em categorias entre A, como mais baixo nível de emissão, até E (IEA, 2020a, 2023c).

O governo alemão tem se movido em direção ao desenvolvimento destes padrões para auxiliar as indústrias na compra de produtos de baixo carbono. A iniciativa *Low Emission Steel Standard* (LESS) foi criada para ajudar a criar demanda por aço de baixo carbono. Ele é um padrão feito a partir dos critérios estabelecidos pela IEA, supracitado, e sua adoção é feita de forma voluntária (STAHL, 2024).

Há também iniciativas estabelecidas a partir de associações como a ResponsibleSteel Certification. Ela é feita com base em 13 princípios e 61 critérios de governança, meio ambiente e social. Os produtos de aço certificados ganham um selo que caracteriza, dentre outras coisas, o nível de descarbonização e a sua pegada de carbono (RESPONSIBLE STEEL, 2024).

Um exemplo de política já estabelecida pelo Brasil é o Programa Mobilidade Verde e Inovação - Programa MOVER. Este programa estabelece “requisitos obrigatórios para a comercialização de veículos novos”, cria um regime de incentivos e um fundo para o desenvolvimento do setor. O programa menciona como uma de suas obrigações o estabelecimento de “requisitos obrigatórios relacionados à pegada de carbono” e poderão ser estabelecidas metas (BRASIL, 2023b).

A classificação e etiquetagem de produtos industriais de baixo carbono diferenciará dos produtos feitos a partir de rotas com maior emissão. Este instrumento criará a base para que empresas e governos possam direcionar suas compras e reduzir as suas emissões à montante de sua cadeia produtiva.

De acordo com o WORLD ECONOMIC FORUM (2022), governos gastam anualmente cerca de \$11 trilhões em contratos públicos. Eles podem usar seu poder de compra para buscar favorecer produtos que possuem conteúdo de carbono menor em suas licitações. Uma iniciativa nesse sentido é o *Green Public Procurement Pledge* (GPP Pledge), lançado durante a COP 28. Ele é um compromisso que estabelece metas e prazos para que os países signatários adotem medidas que buscam reduzir as emissões nas compras públicas. Atualmente, o Canadá, Alemanha, Estados Unidos e o Reino Unido endossam alguns dos objetivos definidos pelo GPP Pledge (UNIDO, 2023). Este direcionamento tem como benefício, não só a redução das emissões, mas ajudará a construir uma economia de baixo carbono, em linha com as metas e compromissos climáticos adotado pelos países.

De forma similar, empresas privadas podem buscar beneficiar determinados fornecedores que apresentam materiais de menor nível de emissão. Nesse sentido, é importante mencionar que diversas empresas já mencionaram o interesse de diminuir às suas emissões indiretas. A iniciativa *Science Based Targets* (SBTi) apresenta um conjunto de padrões e guias para companhias definirem seus objetivos de redução das emissões. Atualmente, cerca de 400 empresas já ingressaram no SBTi, com mais de 100 tendo seus compromissos aprovados pelo programa. Dentre elas, 90% delas possuem metas para reduzir as emissões de GEE ao longo de sua cadeia de valor (CDP, 2023; SBTi, 2023). Isto demonstra que há um interesse do setor produtivo em adquirir materiais de baixo carbono.

Governos também podem fornecer subsídios para determinadas tecnologias ou setores para estimular o desenvolvimento de uma indústria verde. Os Estados Unidos aprovaram a lei *Inflation Reduction Act 2022* (IRA) que destina \$ 369 bilhões para fomentar a transição energética (USDOE, 2023). Esta lei tem como um de seus principais objetivos trazer a redução de 40% nas emissões do país. Dentro dos mecanismos ligados a esta lei, o governo destinará \$6 bilhões em subsídios para setores como aço, cimento e papel.

No cenário B foi identificado a necessidade da utilização de tecnologias inovadoras para atingir os objetivos de redução de emissão de GEE. Estas tecnologias, em linhas gerais, ainda não se encontram no estágio mais avançado de maturidade. Investir em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) é um instrumento necessário tanto para desenvolver novas tecnologias e processos, como também para consolidar aquelas tecnologias em operação, porém em menor escala (*e.g.* fusão redutora a carvão vegetal) (BATAILLE et al., 2018; DUBASH et al., 2023; RISSMAN et al., 2020).

Isto pode ser feito através dos investimentos governamentais em laboratórios, institutos ou centros de pesquisa; através de parcerias público-privadas entre o governo, indústria e academia; apoios ao desenvolvimento empresarial das tecnologias inovadoras; e benefícios fiscais.

RISSMAN et al. (2020) citam a importância de laboratórios governamentais para o desenvolvimento de conhecimento. O governo brasileiro conta com algumas entidades que podem exercer papel relevante no desenvolvimento destas tecnologias: (i) o Instituto Nacional de Tecnologia (INT); (ii) Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM); Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII); Centro de Tecnologia Mineral (Cetem); Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa); e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

No campo empresarial, o Brasil conta com dois grandes centros de pesquisa voltados a área de energia: O Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello (Cenpes) da Petrobras, voltado para o desenvolvimento tecnológico em energia; e o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), vinculado a Eletrobras, focado no desenvolvimento de tecnologias que “promovam a maior segurança e eficiência do setor elétrico”

Um exemplo de política já desenvolvida pelo governo é o Programa de Eficiência Energética. Ele tem como objetivo “promover o uso eficiente da energia elétrica” e obriga as empresas de energia elétrica a aplicarem parte da sua receita em pesquisa e desenvolvimento (BUSTAMANTE, 2018).

Para contornar a falta de pessoal especializado, é necessário que o governo invista no desenvolvimento de programas de educação e certificação voltado a formação de novos empregos ou do retreinamento de profissionais de outros setores (IEA, 2021b, 2022; LA ROVERE, 2019). Nesse sentido, o programa *European Skills Agenda* criado pela UE visa contornar esta barreira. Ele é um programa com 12 ações norteadoras como financiamento de programas educacionais, parcerias com universidades e institutos, além da criação de cursos técnicos para formação de corpo técnico com as habilidades necessárias para adequar os trabalhadores às novas tecnologias. Este programa investirá mais de 80 bilhões de euros e tem como objetivo aumentar a quantidade de pessoas em formação especializada (EUROPEAN COMMISSION, 2023). Similarmente, o governo do Canadá possui fundos específicos para financiar instituições que fornecem treinamentos voltados para empregos ligados a tecnologias de baixo carbono e em setores críticos para transição energética como a mineração (NATURAL RESOURCES CANADA, 2022).

Uma forma de tornar as tecnologias de menor intensidade de emissões mais competitivas em relação às tecnologias fósseis, é a precificação de carbono (DUBASH et al., 2023). A precificação de carbono é uma medida custo-efetiva de reduzir as emissões de GEE. A criação do mercado de carbono é uma medida bem-vista pelo setor industrial brasileiro (CNI, 2021). Atualmente no Brasil tramita no congresso nacional o PL 2.148 que visa criar o mercado de carbono bem como o Plano Nacional de Alocação de Emissões, crucial para que esta política seja feita de forma eficiente.

Nos resultados encontrados nesta tese, a biomassa pode ter papel central na descarbonização do setor industrial brasileiro. Como mencionado, esta medida de mitigação enfrenta algumas barreiras ligadas a questões técnicas, econômicas e regulatórias para que sua expansão seja promovida. Uma forma de incentivar o uso desta fonte de energia pode ser através de programas e políticas como a formulação de um programa nacional. Um instrumento para favorecer fontes de biomassa como carvão vegetal é a garantia de

financiamentos de longo prazo, em função dos longos períodos necessários para o plantio e colheita da matéria prima.

Outro instrumento que pode ser utilizado para promover o uso de biomassa são os incentivos fiscais na forma de subsídio. Na Holanda, o projeto *Stimulation of Sustainable Energy Production* garante subsídio a projetos de biomassa (NETHERLANDS ENTERPRISE AGENCY, 2023). Para receber este incentivo, as empresas precisam atender a critérios ligados a gestão do uso do solo e outras práticas sustentáveis. Atualmente o Fundo Clima possui um subprograma para promover a eficiência e a sustentabilidade da promoção de carvão vegetal.

O incentivo a utilização de resíduos também é importante para promover a redução de emissões na indústria, em especial, no setor de cimento. Apesar do Brasil possuir a Política Nacional de Resíduos Sólidos (MMA, 2020) e outras normas que promovem o uso de resíduos como fonte de energia (CONAMA/MMA, 2020), ainda há espaço para melhorias. Nesse sentido, os licenciamentos ambientais para utilização deste tipo de combustível podem ser simplificados ou dispensados. Também podem ser taxados aterros de forma que seja estimulado a disposição de resíduos para fins energéticos, como é feito no Reino Unido (UNFCCC, 2018).

A Tabela 44 apresenta os instrumentos que podem ser utilizados pelo setor industrial para alavancar o desenvolvimento de uma economia de baixo carbono no setor industrial brasileiro.

Tabela 44 - Instrumentos para superar as barreiras a descarbonização da indústria brasileira

Medidas de mitigação	Instrumentos
Eficiência energética	Linha de crédito para eficiência energética
	Diversificação de produtos financeiros
	Diretrizes uniformes para análise de crédito
	Precificação de carbono
	Desburocratização do acesso ao crédito para medidas de baixo carbono
	Incentivar a participação das Empresas Economizadoras de Energia (ESCOS) no setor industrial

	Estabelecimento de padrões (energia e emissões)
	Criação de selos para produtos industriais de baixo carbono
	Consolidação e disseminação de tecnologias de baixo carbono
	Criação e investimento de programas educacionais para formar corpo técnico especializado
	Regulamentação de resíduos florestais/RSU para incentivar o uso como fonte de energia
Substituição de combustíveis e materiais	Melhorias regulatórias que promovem a reciclagem
	Incentivos fiscais
	Financiamento de longo prazo
	Consolidação e disseminação de tecnologias de baixo carbono
	Estabelecimento de padrões de energia e emissões
	Criação de selos de baixo carbono
	Licenciamento para compras públicas direcionada produtos de baixa emissão
Novos processos e tecnologias	Realização de atividades de formação e campanhas de sensibilização sobre a adoção de tecnologias chave de baixo carbono
	Subsídios
	Financiamento de P&D
	Melhorias regulatórias que promovem a reciclagem
	Diferenciação no processo de licenciamento ambiental para indústrias que utilizam medidas mais sustentáveis
	Maior integração do planejamento industrial com o planejamento florestal

Fonte: elaboração própria.

6.5.3. Oportunidades

Por maiores que sejam os entraves encontrados pelo setor durante esse processo, toda mudança carrega consigo um conjunto de oportunidades que podem ser aproveitadas de forma a facilitar ou alavancar a indústria nacional.

O Brasil é um país que se destaca mundialmente pela amplitude renovável da sua matriz energética. Fontes renováveis respondem por cerca de 85% da sua geração elétrica e

60% no setor industrial, o país se encontra em posição de vantagem na transição energética. Como visto nos resultados desta tese, a eletrificação é uma medida de mitigação com grande potencial para reduzir as emissões de GEE no setor industrial. Tanto na indústria pesada, como na siderurgia através dos fornos a arco elétrico, quanto nas indústrias leves.

Esta característica reduz a necessidade do país descarbonizar o setor elétrico, como acontecem em outros países. A adoção de medidas de eletrificação na Europa e nos Estados Unidos, por exemplo, pode ser alvo de crítica uma vez que não está energia elétrica não está sendo gerada a partir de fontes renováveis.

A vantagem do Brasil sobre outros países pode ser vista nos compromissos climáticos. O nível de renováveis na matriz elétrica brasileira hoje é a meta de países como Alemanha em 2050¹² (EPE, 2023a; IEA, 2020b).

Os resultados nesta tese apresentaram o papel das tecnologias na descarbonização. Enquanto o mundo discute tecnologias inovadoras para mitigar as emissões de gases de efeito estufa, o Brasil pode atingir seus compromissos climáticos a partir de tecnologias tradicionais. Tecnologias como hidrogênio e captura de carbono são frequentemente citadas como ferramentas essenciais para descarbonizar o setor industrial (BATAILLE, 2020b, 2020c; IEA, 2020d; IPCC, 2014b). No cenário A, poucas tecnologias de mitigação inovadoras foram necessárias para atingir os objetivos de redução nas emissões. Mesmo no Cenário B, onde algumas destas tecnologias se fazem mais necessárias, sua participação na descarbonização não é majoritária frente a medidas já maduras. Esta característica permite que o país reduza suas emissões a custos inferiores a outros países, o que gera um aumento da competitividade da indústria nacional.

Mesmo que o modelo não tenha encontrado como resultado o uso de hidrogênio na siderurgia. É importante destacar que o seu uso no Brasil pode também representar uma oportunidade para economia brasileira. Considerando o alto nível de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira, o país já parte de uma grande vantagem ao utilizar esta rota tecnológica. Além disso, estudos mostram que o Brasil poderá ter um dos hidrogênios de

¹² A Alemanha possui como meta aumentar a participação de fontes renováveis na geração de energia elétrica chegando a 80% em 2050. Hoje no Brasil o percentual de fontes renováveis é aproximadamente 85% (EPE, 2021a; IEA, 2020c)

baixo carbono mais baratos do mundo (MCKINSEY & COMPANY, 2021). O baixo custo dessa fonte de energia poderá representar o surgimento de uma nova indústria de energia no país. E havendo condições de infraestrutura e políticas, o hidrogênio poderá, sim, ter papel mais significativo na descarbonização industrial.

Não é só a eletricidade renovável que destaca o Brasil perante outros países. O alto nível de biomassa na matriz energética brasileira é referência na geração de energia e na indústria, como na produção de aço. A AçoVerde Brasil é certificada como a primeira indústria a produzir um aço com zero emissões no mundo (AVB, 2022). Com este recurso, o país abre o leque de opções de mitigação no setor siderúrgico. Desta forma, a descarbonização da siderurgia nacional pode não ser a única oportunidade dada a oferta de fontes não-fósseis para sua produção. O Brasil pode desenvolver uma nova indústria siderúrgica, tanto na produção de aço quanto na produção de ferro-gusa, briquetes de ferro e ajudar a descarbonização da indústria siderúrgica global.

A siderurgia, como uma das principais fontes de emissão do país, pode ocupar posição de relevância na chamada *neoindustrialização* (SILVA; ALCKIMIN, 2023). O Brasil conta com uma das maiores reservas de minério de ferro do mundo, em especial possui também uma reserva de minério de ferro de alta concentração, essencial para produção de aço de baixo carbono. Atualmente, a maior parte deste minério é exportado para países como China, que possui a maior produção de aço no mundo e os menores preços no mercado internacional.

Frente ao desafio de produzir um aço a preço competitivo com a indústria chinesa, a indústria siderúrgica brasileira pode se beneficiar da necessidade dos países em se descarbonizar. Para além das projeções de produção definidas nesta tese, a indústria de aço nacional pode atrair investimentos externos para instalação de plantas visando a exportação do aço de baixo carbono.

Estas condições que favorecem a competitividade da siderurgia nacional também se aplicam para a indústria como um todo. A produção química, que sofre com a importação de produtos chineses de menor custo, poderá se reerguer em um cenário internacional onde há demanda por produtos de baixo conteúdo de carbono.

O processo de transição para esta nova economia baseada em fontes renováveis trará uma carga de investimentos. Por sua vez, um dos cobenefícios da descarbonização da indústria brasileira é a geração de empregos. Em cenários desenvolvidos por (IRENA, 2023), cerca de 40 milhões de empregos podem ser gerados no mundo graças à transição energética. Para países do G20, o estudo mostrou que os investimentos públicos e privados alinhados com a transição energética poderá aumentar em 1,6% os empregos frente a um cenário *business as usual*.

Em linhas gerais, a descarbonização da indústria brasileira não é apenas uma necessidade ligada as mudanças climáticas. Frente a um mundo em transformação, o Brasil poderá usufruir das suas vantagens competitivas ligadas a abundância de recursos naturais, em especial as fontes renováveis, para se colocar na vanguarda da transição energética e da economia de baixo carbono, gerando benefícios ambientais, econômicos e sociais.

7. Conclusões

Para mapear os possíveis caminhos da descarbonização da economia brasileira, é preciso analisar como o setor industrial poderá reduzir suas emissões de GEE. Os questionamentos sobre como a indústria poderá atingir suas metas climáticas ganham destaque devido a importância do setor na economia, suas altas emissões e a dificuldade para abatê-las. A diversidade do setor é um agravante para fazer essas análises: para cada segmento que forma o conjunto do setor industrial, há uma série de peculiaridades que precisam ser consideradas. Neste sentido, esta tese desenvolveu um modelo que permite iluminar os possíveis caminhos de descarbonização da indústria brasileira através da análise de seu perfil energético e de processos. Além disso, a abordagem desenvolvida permite efetuar uma análise comparativa das diferentes opções de mitigação, tanto tecnologias tradicionais quanto as inovadoras, quanto a seu potencial e custos.

7.1. Contribuições para o setor industrial brasileiro

A partir da revisão da literatura, percebeu-se uma lacuna no conhecimento a respeito da modelagem energética e de emissões do setor industrial. Poucos modelos apresentam uma descrição detalhada da indústria como um todo. Aqueles que se aprofundam, o fazem apenas naqueles segmentos industriais de maior intensidade de emissão (aço, cimento e química). Outros que fazem uma análise geral do setor, não trazem detalhamento nas etapas e rotas tecnológicas dos demais segmentos industriais. Além disso, poucos são os estudos que buscam entender o papel das tecnologias inovadoras dentro do setor industrial.

Neste sentido, a modelagem do setor industrial brasileiro desenvolvida nesta tese permite que sejam analisados diversos caminhos para descarbonizar o setor. Foi feita uma descrição detalhada da produção de onze segmentos industriais que compõem o setor em termos de emissão e suas principais tecnologias, tanto as tradicionais quanto as inovadoras. Adicionando restrições de emissões, fornecimento de matéria-prima, implementação de tecnologias, o modelo desenvolvido nesta tese busca traçar os caminhos a partir da minimização dos custos de mitigação.

Em um primeiro nível, os resultados do modelo nos trazem informações a respeito das mudanças no perfil energético do setor que poderá ocorrer em função das limitações de

emissões. Como mostrado nos resultados desta tese, a redução das emissões do setor siderúrgico demandará uma oferta maior de recursos como carvão vegetal e eletricidade, como também de sucata. Este tipo de resultado é fundamental para que tomadores de decisão consigam exercer o planejamento energético do país de forma eficiente e assertiva.

Em um segundo momento, outro resultado importante gerado a partir do arcabouço metodológico aqui apresentado é o papel de cada uma das tecnologias na transição energética. Com a diversidade de opções de mitigação, o modelo seleciona aquelas que são mais custo-efetivas para atingir os compromissos climáticos definidos. Isto nos ajuda a entender quais tecnologias poderão ter maior protagonismo na transição e ajudar a direcionar políticas públicas para facilitar a sua implementação. Para exemplificar, um dos resultados do Cenário B mostra que, para a siderurgia atingir suas metas de emissão, a tecnologia de Redução Direta utilizando GN se torna uma das mais relevantes.

Um ponto importante relativo à forma como foi desenvolvido este método é a escolha das ferramentas para elaborar o arcabouço matemático. A utilização da linguagem de programação Python garante ao modelo flexibilidade e facilidade para que ele seja utilizado e aprimorado, a partir da adição de novas tecnologias ou até mesmo integrado a outros modelos, como por exemplo de Equilíbrio Geral Computável. Ademais, o código desenvolvido foi hospedado em um sistema aberto para fornecer transparência e acessibilidade a todos que queiram estudá-lo ou utilizá-lo.

As análises dos caminhos desta tese permitem definir alguns elementos centrais para transição da indústria brasileira a uma economia de baixo carbono. Primeiramente, a biomassa pode exercer protagonismo devido a sua versatilidade tanto como fonte de energia para indústria leve e intensiva, como também sendo matéria prima para processos siderúrgicos e químicos. A eletricidade, é outro recurso que fornece grandes potenciais de mitigação atrelados a custos competitivos frente outras tecnologias. Considerando estes dois elementos, é importante traçar políticas públicas alinhadas com o fornecimento destes recursos naturais que servirão de base para o desenvolvimento da indústria brasileira.

Para alinhar o seu parque industrial com uma trajetória de descarbonização, o setor precisará superar diversos desafios. Nesta tese, foram mapeadas barreiras que o setor tem enfrentado e dificultam a adoção de medidas de menor intensidade de emissões. O alto custo

das tecnologias de mitigação, a falta de financiamento para estas tecnologias e os custos das alternativas renováveis são algumas destas barreiras financeiras. No âmbito político, é importante que as regulamentações busquem estimular o uso de fontes renováveis para além da eletricidade. Os resíduos são fundamentais na descarbonização da indústria de cimento e a biomassa é fonte que contribui com a redução das emissões de forma transversal entre os setores industriais. Além disso, não basta que haja condições de investimento e oferta de recursos naturais. O país possui um déficit de mão-de-obra especializada que poderá comprometer o desenvolvimento de uma nova indústria.

Em linhas gerais, é importante desenvolver mecanismos financeiros para tornar as tecnologias de baixo carbono mais atrativas e com menor risco. É fundamental que haja crédito disponível e a juros menores para alavancar estas tecnologias. Além disso, é importante que arcabouços regulatórios sejam implementados para melhor precificar recursos energéticos renováveis, como resíduos e biomassa. Ambas as fontes trazem benefícios ambientais para sociedade quando utilizadas. A criação de um mercado de carbono é uma medida já mencionada pelo setor como instrumento para ajudar a tornar as tecnologias de menor emissão mais competitivas. E por último, é imprescindível que o país invista em pesquisa e desenvolvimento. Um corpo técnico qualificado é necessário para, em primeiro lugar, atender a demanda por postos de trabalho na neointustrialização. Em segundo, o Brasil possui um conjunto de recursos naturais únicos. O desenvolvimento de novas tecnologias a luz da realidade brasileira só poderá ser feito através da inovação, que nasce nas universidades e centro de pesquisas.

Nos resultados desta teses, tecnologias inovadoras, de forma geral, só são necessárias em casos de maiores necessidades da redução de emissões de GEE e no longo prazo. Isto garante ao Brasil, tempo maior para implementar estas tecnologias que possuem custos relativamente altos quando comparados com a substituição energética já disponível.

As sucessivas crises enfrentadas nos últimos 10 anos, a falta de política industrial e um mercado internacional inundado por produtos chineses de menor custo são algumas das características que montam o atual cenário. E ele não se apresenta favorável para novos investimentos. A redução das emissões necessitará de mais investimentos, que podem levar a um aumento do custo de produção. No entanto, o mundo vive um momento de transformação

onde são buscadas novas soluções que permitam atender as necessidades da população com um menor impacto ambiental. Frente a estes desafios, o Brasil poderá contornar o retrocesso enfrentado pela indústria.

Assim, o presente trabalho trouxe um arcabouço metodológico para que seja possível analisar os caminhos da descarbonização da indústria brasileira, sob a ótica das principais tecnologias de mitigação e dos recursos naturais, que atraem interesse global. Sistema elétrico com 90% de fontes renováveis, maiores reservas de minério no mundo, uma forte indústria de alimentos, e potencial para geração de energia a partir de biomassa são algumas das qualidades do país. Se estas vantagens competitivas forem canalizadas para o desenvolvimento de uma nova indústria de baixo carbono, os benefícios da transição energética não se restringirão aos ambientais. O crescimento de uma indústria siderúrgica e química verde, o desenvolvimento de novas tecnologias e a posição de vanguarda na descarbonização terão impacto positivo na geração de renda e empregos.

7.2. Limitações e recomendações

Para desenhar o modelo de energia e emissões da indústria, foi traçada uma linha de contorno que visou agrupar as necessidades a serem avaliadas nesta tese. O escopo definido focou na estrutura produtiva do setor industrial e seus combustíveis. Desta forma, algumas variáveis precisaram ser simplificadas.

Uma delas é a questão espacial da indústria. Os preços e a oferta de energia e recursos naturais no país não são uniformes. O preço da energia elétrica varia em relação a distribuidora, com diferenças que podem chegar a 60% (ANEEL, 2020). Além disso, a biomassa tem seus custos influenciados pelos gastos logísticos desde a geração até o consumidor. Desta forma, um avanço adicional ao trabalho desenvolvido nesta tese pode ser obtido através da integração da modelagem da oferta de energia, principalmente em relação a biomassa e resíduos, ao consumo energético industrial.

Um exemplo de estudo que pode ser feito à luz dos resultados encontrados desta tese é a análise espacial da expansão da produção de ferro-gusa e aço no território nacional. Os atuais principais estados produtores de aço são Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais. Em uma expectativa de demanda internacional por baixo carbono, talvez outros estados

possam surgir como novos polos industriais na produção de aço. Piauí, Maranhão e Ceará possuem alto potencial de geração de energia renovável a partir de fontes eólicas. Muitos estudos apontam os estados do norte/nordeste como potenciais para geração de hidrogênio verde graças a estas condições. Além disso, a oferta de minério com alto teor de ferro se encontra no norte do país. Entender quais podem se tornar pontos prioritários para produção de aço é um caminho para avançar na pesquisa científica relacionada à descarbonização da indústria.

Outro aspecto é ligado aos preços, como o foco do trabalho é o setor industrial, o sistema de oferta de energia não foi modelado. Em outras palavras, o aumento da capacidade de geração de energia elétrica, tendo como base fontes 100% renováveis, poderá acarretar um aumento do preço dessa fonte, impactando os custos. Conectar o modelo desenvolvido aqui com outros modelos de geração da expansão a fim de obter um olhar integrado sobre o sistema energético pode trazer novas perspectivas sobre a descarbonização.

Nesse mesmo sentido, o atual modelo pode ser utilizado como base para modelos de Equilíbrio Geral Computável, como o IMACLIM-BR. Os resultados como consumo energético e custos de mitigação podem servir como insumo para esse tipo de modelo e assim avaliar o impacto de políticas climáticas (*e.g.* precificação de carbono) não só dentro da cadeia industrial, mas na economia como um todo. Este tipo de exercício já foi feito, como pode ser visto em (GROTTERA et al., 2022; WILLS et al., 2021), usando um modelo de simulação sem a penetração de tecnologias inovadoras no setor industrial.

Já em relação às tecnologias, apesar da vasta quantidade de medidas de mitigação consideradas nas análises desta tese (82 tecnologias), ainda há espaço para outras com menos maturidade tecnológica ou menos propícias para condições brasileiras. Por exemplo, tecnologias de geração de calor como solar, hidrogênio e nuclear não foram consideradas dado as premissas assumidas, mas podem ser analisadas em função de outros cenários.

Além destas tecnologias, a redução das emissões do setor industrial pode ser feita pelo lado da demanda (BATAILLE; NILSSON; JOTZO, 2021). Medidas como uso mais eficiente de materiais na construção civil, melhorias de *design* em veículos e mudanças no sistema de transporte podem reduzir o consumo aparente de materiais da indústria siderúrgica, cimenteira e química (RISSMAN et al., 2020). Analisar o potencial de mitigação

destas tecnologias pode ser feito a partir deste modelo ao indexar um módulo ligado a demanda destes produtos.

Em linhas gerais, o trabalho desenvolvido nesta tese poderá servir de base para aqueles que buscarem expandir as análises sobre a redução das emissões de GEE no Brasil. Ainda há muitas perguntas a serem respondidas em relação aos impactos ao longo da cadeia produtiva e na economia como um todo, bem como as influências no mercado internacional. O aprofundamento da análise feita aqui é fundamental para ajudar o país a encontrar o seu melhor caminho de descarbonização.

Referências

- ABAL. **Brazilian aluminum: Solutions for sustainable living**. São Paulo.
- ABAL; CNI. A sustentabilidade da indústria brasileira do alumínio. 2017.
- ABIQUIM. **O DESEMPENHO DA INDÚSTRIA QUÍMICA BRASILEIRA**.
- ABRAFE. Anuário Estatístico ABRAFE 2023 Ano Base 2022. 2023.
- AGÊNCIA BRASIL. Indústria do aço volta a ter produção no nível pré-pandemia. 29 set. 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas**. , 2023.
- AGORA. **Power-2-Heat Gas savings and emissions reduction in industry**. Disponível em: <www.future-camp.de>.
- AN, R. et al. Potential of energy savings and CO2 emission reduction in China's iron and steel industry. **Applied Energy**, v. 226, n. February, p. 862–880, 2018.
- ANEEL. **Informações de Geração**.
- ANGELKORTE, G. B. **OPORTUNIDADES PARA A TRANSIÇÃO SUSTENTÁVEL DA AGROPECUÁRIA BRASILEIRA**. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 2023.
- ANM. **Anuário Mineral Brasileiro - Principais substâncias metálicas 2020**. Brasília.
- ARCELORMITTAL. **ArcelorMittal S.A.: ArcelorMittal inaugurates flagship carbon capture and utilisation project at its steel plant in Ghent, Belgium**.
- ARENS, M. et al. Pathways to a low-carbon iron and steel industry in the medium-term – the case of Germany. **Journal of Cleaner Production**, v. 163, p. 84–98, 2017.

- ARENS, M.; WORRELL, E.; SCHLEICH, J. Energy intensity development of the German iron and steel industry between 1991 and 2007. **Energy**, v. 45, n. 1, p. 786–797, 2012.
- ATES, S. A. Energy efficiency and CO2 mitigation potential of the Turkish iron and steel industry using the LEAP (long-range energy alternatives planning) system. **Energy**, v. 90, p. 417–428, 2015.
- AVB. Aço Verde do Brasil (AVB) se torna a primeira usina siderúrgica carbono neutro do mundo.**
- BACHNER, G. et al. Risk assessment of the low-carbon transition of Austria’s steel and electricity sectors. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, v. 35, n. December 2018, p. 309–332, 2020.
- BAJAY, S. V.; BEISSMANN, A.; GORLA, F. D. **Oportunidades de Eficiência Energética para a indústria: Relatório Setorial: setor químico - CNI Unidade de Competitividade Industrial – COMPI** ., 2010.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Políticas Monetárias - Meta para Inflação -Taxa Selic.**
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Boletim Focus.**
- BANCO MUNDIAL. **Carbon Pricing Dashboard.** Disponível em: <<https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/>>. Acesso em: 9 dez. 2023.
- BASHMAKOV, I.A., L. J. et al. Industry. Em: **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge: Cambridge University Press, 2022. p. 271–293.
- BATAILLE, C. et al. A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 960–973, 2018.

- BATAILLE, C. et al. Net-zero deep decarbonization pathways in Latin America: Challenges and opportunities. **Energy Strategy Reviews**, v. 30, 2020.
- BATAILLE, C. Low and zero emissions in the steel and cement industries Barriers, technologies and policies. **Greening heavy and extractive industries, Paris**, v. No. 2020/0, n. 66, p. 1–3, 2020a.
- BATAILLE, C. **Technology and policy pathways to net-zero heavy Industry , & implications for developing countries.** , 2020b.
- BATAILLE, C. G. F. Physical and policy pathways to net-zero emissions industry. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 11, n. 2, p. 1–20, 2020c.
- BATAILLE, C.; NILSSON, L. J.; JOTZO, F. Industry in a net-zero emissions world: new mitigation pathways, new supply chains, modelling needs and policy implications. **Energy and Climate Change**, v. 2, n. September, p. 100059, 2021.
- BAZZANELLA, A. 1968-; AUSFELDER, F. **Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry.**
- BHADBHADDE, N.; ZUBERI, M. J. S.; PATEL, M. K. A bottom-up analysis of energy efficiency improvement and CO2 emission reduction potentials for the swiss metals sector. **Energy**, v. 181, p. 173–186, 2019.
- BHASKAR, A.; ASSADI, M.; SOMEHSARAEI, H. N. Decarbonization of the iron and steel industry with direct reduction of iron ore with green hydrogen. **Energies**, v. 13, n. 3, p. 1–23, 2020.
- BNDES. **BNDES Finem - Meio Ambiente - Eficiência Energética.** Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndes-finem-eficiencia-energetica>>. Acesso em: 29 nov. 2023.
- BNDES. **Fundo Clima.** Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/fundo-clima>>. Acesso em: 10 dez. 2023.

BRADESCO. **Economia em Dia - Informações Setoriais - Agricultura**. Disponível em:
<<https://www.economiaemdia.com.br/SiteEconomiaEmDia/Monitores/Setorial>>.

BRASIL. **Produção nacional de fertilizantes**. Brasília.

BRASIL. Projeto de Lei nº 1425, de 2022. 2022 a.

BRASIL. Senado Federal. Projeto de Lei Nº 1425, DE 2022. 2022 b.

BRASIL. LEI Nº 14.711, DE 30 DE OUTUBRO DE 2023. 2023 a.

BRASIL. Medida Provisória 1.205 de Dezembro de 2023. 2023 b, p. 1–10.

BRASIL. **Nova Indústria Brasil - Missões, Metas e Ações da Política Industrial - Resumo**. Brasília.

BRAZIL. **LEI Nº 12.305 - Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Disponível em:
<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 31 ago. 2021.

BUDINIS, S. et al. An assessment of CCS costs, barriers and potential. **Energy Strategy Reviews**, v. 22, n. August, p. 61–81, 2018.

BUSTAMANTE, J. F. V. **Políticas e programas de eficiência energética para a indústria no Brasil: uma avaliação crítica e rotas para avanços**. UNICAMP, 2018.

CAGNO, E. et al. A novel approach for barriers to industrial energy efficiency. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 290–308, 2013.

CAGNO, E.; TRIANNI, A. Evaluating the barriers to specific industrial energy efficiency measures: An exploratory study in small and medium-sized enterprises. **Journal of Cleaner Production**, v. 82, p. 70–83, 2014.

CARLANDER, J.; THOLLANDER, P. Barriers to implementation of energy-efficient technologies in building construction projects — Results from a Swedish case study. **Resources, Environment and Sustainability**, v. 11, 1 mar. 2023.

CDP. **Volkswagen AG - Climate Change 2022.**

CENTRO CLIMA. **PROJETO IES-BRASIL 2050: SÍNTESE.**

CENTRO CLIMA. **Parte III. Plano de Mitigação do Setor Industrial. Uma Estratégia de Descarbonização para uma Economia Brasileira de Zero Carbono Líquido em 2050: Instrumentos de Política e Planos Setoriais de Mitigação.**

CENTRO CLIMA; TALANOIA INSTITUTE. **Clima E Desenvolvimento : Visões Para O Brasil 2030.**

CETESB. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos de São Paulo.**

CETESB; FIESP. **GUIA TÉCNICO AMBIENTAL DA INDÚSTRIA DE CERÂMICA BRANCA E DE REVESTIMENTO.** p. 1–84, 2008.

CETESB; SINDITEXTIL. **Guia Técnico Ambiental da Indústria Têxtil - Série P+L.** São Paulo.

CHAO, C. et al. Post-combustion carbon capture. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 138, p. 110490, mar. 2021.

CHEN, W.; YIN, X.; MA, D. A bottom-up analysis of China's iron and steel industrial energy consumption and CO₂ emissions. **Applied Energy**, v. 136, n. 2014, p. 1174–1183, 2014.

CHUNG, C. et al. Decarbonizing the chemical industry: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options. **Energy Research and Social Science**, v. 96, n. October 2022, p. 102955, 2023.

CNI. **Sondagem Especial - Indústria de Transformação e Extrativa.**

CNI. **Contribuição da indústria para a agenda de financiamento climático.** 2018.

CNI. **Crédito de curto e longo prazos.** Brasília.

CNI. **A PRECIFICAÇÃO DE CARBONO E CADEIA DE VALOR COMPETITIVIDADE DA OS IMPACTOS NA DA INDÚSTRIA: RESUMO EXECUTIVO.** Brasília.

CNI. **CNI apoia regulamentação de mercado de carbono no Brasil - Agência de Notícias da Indústria.** Disponível em: <<https://noticias.portaldaindustria.com.br/posicionamentos/cni-apoia-regulamentacao-de-mercado-de-carbono-no-brasil/>>. Acesso em: 17 nov. 2021.

CNI. **Sondagem Especial 87: Condições de acesso ao Crédito.** Brasília, DF.

CNI. **Micro e Pequenas Empresas.** Disponível em: <<https://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/micro-e-pequena-empresa/>>.

CNI. **Perfil da Indústria Brasileira - Indústria de Transformação.**

CONAMA/MMA. Resolução 499/2020. v. 2020, 2020.

COUTO, L. C. C. B. **OPÇÕES DE MITIGAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESUTFA EM SETORES-CHAVE DO BRASIL: METALURGIA DE METAIS NÃO FERROSOS.** Rio de Janeiro.

DE GOUELLO, C. et al. **Brazil Low-carbon Country Case Study.** Washington, DC, 2010.

DE OLIVEIRA, C. C. N. **OPÇÕES DE MITIGAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM SETORES-CHAVE DO BRASIL: SETOR DE CIMENTO.** Rio de Janeiro.

DE SOUZA, J. F. T.; PACCA, S. A. Carbon reduction potential and costs through circular bioeconomy in the Brazilian steel industry. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 169, n. January, 2021.

DINGA, C. D.; WEN, Z. China's green deal: Can China's cement industry achieve carbon neutral emissions by 2060? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 155, n. April 2021, p. 111931, 2022.

DUBASH, N. K. et al. National and Sub-national Policies and Institutions. Em: **Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change**. Cambridge University Press, 2023. p. 1355–1450.

E+ ENERGY TRANSITION INSTITUTE. **Scoping Paper on the Brazilian Steel Industry Decarbonization**. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://emaisenergia.org/wp-content/uploads/2022/09/EDecarbonization_Steel_Industry.pdf>.

EBC. **Fuga de cérebros, a diáspora de cientistas brasileiros**.

ELEMENT ENERGY & JACOBS. Industrial Fuel Switching Market Engagement Study. n. December, 2018.

EPE. **Balço Energético Nacional 2009. Anexo IV: Variação da Energia Final , Útil e do Potencial de Economia de Energia Evolução Brasil 1984 a 2004**.

EPE. ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SEGMENTOS INDUSTRIAIS SELECIONADOS: ALUMÍNIO. 2017.

EPE. **Análise da eficiência energética em segmentos industriais selecionados: segmento cadeia siderúrgica**.

EPE. ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SEGMENTOS INDUSTRIAIS SELECIONADOS: SEGMENTO QUÍMICO.

EPE. **Análise da Eficiência Energética em Segmentos Industriais Selecionados**.

EPE. ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SEGMENTOS INDUSTRIAIS SELECIONADOS: ALIMENTOS E BEBIDAS.

EPE. Cenários Econômicos para o PNE 2050. p. 35, 2018e.

EPE. ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SEGMENTOS INDUSTRIAIS SELECIONADOS: SEGMENTO CERÂMICA. Rio de Janeiro, Brasil.

EPE. Precificação de carbono: riscos e oportunidades para o Brasil. p. 2–69, 2020.

EPE. Balanço Energético Nacional. 2021.

EPE. **A Indústria de Papel e Celulose no Brasil e no Mundo: Panorama Geral.**

Disponível em: <<https://www.braziliannr.com/brazilian-regulatory-standards/nr25-industrial-waste/%0Ahttps://www.braziliannr.com/brazilian-environmental-legislation/conama-resolution-35705/%0Ahttp://www.inmetro.gov.br/laboratorios/rbc/%0Ahttp://intranetdoc.epagri.sc.gov.br>>.

EPE. Balanço Energético Nacional - BEN 2023. **Empresa de Pesquisa Energética**, p. 268, 2023a.

EPE. **Captura e Armazenamento de Carbono: Um breve guia sobre uma das alternativas-chave para a transformação do setor de óleo e gás no Brasil.** Rio De Janeiro.

EUROFER. **A Steel Roadmap for A Low Carbon Europe**Eurofer. Disponível em: <http://www.nocarbonnation.net/docs/roadmaps/2013-Steel_Roadmap.pdf>.

EUROPEAN COMMISSION. **Taxation and Customs Union - Carbon Border Adjustment Mechanism.**

EUROPEAN COMMISSION. **REPORT FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL on the functioning of the European carbon market in 2022 pursuant to Articles 10(5) and 21(2) of Directive 2003/87/EC.** Brussels.

EUROPEAN COMMISSION. Green Deal Industry Plan - Pluggin The Skills Gap. n. February, 2023.

EXAME. **Energia cara tira indústrias do Brasil.**

FAN, Z.; FRIEDMANN, S. J. Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy. **Joule**, v. 5, n. 4, p. 829–862, 2021.

- FLEITER, T. et al. A methodology for bottom-up modelling of energy transitions in the industry sector: The FORECAST model. **Energy Strategy Reviews**, v. 22, n. July 2017, p. 237–254, 2018.
- FONG-SAM, Y. The Mineral Industry of Brazil. v. 32, n. 2, p. 14, 2022.
- FRIEDMANN, S. J.; FAN, Z.; TANG, K. E. **LOW-CARBON HEAT SOLUTIONS FOR HEAVY INDUSTRY: SOURCES, OPTIONS, AND COSTS TODAY**. Disponível em: <www.sipa.columbia.edu>.
- GCCA. **GNR Project Reporting CO2**. Disponível em: <<https://gccassociation.org/gnr/>>. Acesso em: 10 ago. 2021.
- GICC. **FINANCIAL SUPPORT FOR GREEN TECHNOLOGY DEVELOPMENT : CHINA ' S PRACTICES AND EXPERIENCES**.
- GILBERT, P. et al. Assessing economically viable carbon reductions for the production of ammonia from biomass gasification. **Journal of Cleaner Production**, v. 64, p. 581–589, fev. 2014.
- GLOBAL ESCO NETWORK. **Incorporating Energy Service Companies in Nationally Determined Contributions - The Potential of ESCOs for Meeting the Climate Goals in the Paris Agreement**.
- GRIFFIN, P. W. Radical Change in Energy Intensive UK Industry. p. 1–264, 2015.
- GROTTERA, C. **The Role of Lifestyle Changes in Low-Emissions Development Strategies - The Case of Brazil**. UFRJ, 2018.
- GROTTERA, C. et al. Energy policy implications of carbon pricing scenarios for the Brazilian NDC implementation. **Energy Policy**, v. 160, n. December 2020, 2022.
- GRUBB, M. et al. The costs of limiting fossil-fuel CO2 emissions: a survey and analysis. **Annual Review of Energy and the Environment**, p. 397–478, 1993.

GÜERECA, L. P.; TORRES, N.; JUÁREZ-LÓPEZ, C. R. The co-processing of municipal waste in a cement kiln in Mexico. A life-cycle assessment approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 107, p. 741–748, 2015.

GVCES. IMPLEMENTAÇÃO DO PLANO INDÚSTRIA DE BAIXO CARBONO PROPOSTAS DE FOMENTO PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA RELATÓRIO COMPLETO CENTRO DE ESTUDOS EM SUSTENTABILIDADE DA FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS (GVces / FGV-EAESP).

HAMMOND, G. P.; AKWE, O. S. O.; WILLIAMS, S. Techno-economic appraisal of fossil-fuelled power generation systems with carbon dioxide capture and storage. **Energy**, v. 36, n. 2, p. 975–984, 2011.

HARPPRECHT, C. et al. Decarbonization scenarios for the iron and steel industry in context of a sectoral carbon budget: Germany as a case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 380, n. P2, p. 134846, 2022.

HASANBEIGI, A. et al. **International Best Practices for Pre-Processing and Co-Processing Municipal Solid Waste and Sewage Sludge in the Cement Industry**, 2012.

HASANBEIGI, A. et al. A bottom-up model to estimate the energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction potentials in the Chinese iron and steel industry. **Energy**, v. 50, n. 1, p. 315–325, 2013a.

HASANBEIGI, A. et al. Energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction opportunities in the cement industry in China. **Energy Policy**, v. 57, p. 287–297, 2013b.

HASANBEIGI, A.; MENKE, C.; PRICE, L. The CO₂ abatement cost curve for the Thailand cement industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 15, p. 1509–1518, 2010.

HASANBEIGI, A.; SPRINGER, C. How Clean Is the U.S. Steel Industry? n. November, 2019.

- HEBEDA, O. et al. Pathways for deep decarbonization of the Brazilian iron and steel industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 401, p. 136675, 15 maio 2023.
- HENRIQUES, M. F. **POTENCIAL DE REDUÇÃO DE EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA PELO USO DE ENERGIA NO SETOR INDUSTRIAL BRASILEIRO**. UFRJ, 2010.
- HENRIQUES, M. F.; DANTAS, F.; SCHAEFFER, R. Potential for reduction of CO2 emissions and a low-carbon scenario for the Brazilian industrial sector. v. 38, p. 1946–1961, 2010.
- HOURCADE, J. C. et al. Estimating the Costs of Mitigating Greenhouse Gases. Em: **Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions**. Cambridge University Press, 1996.
- HUANG, Y. H.; CHANG, Y. L.; FLEITER, T. A critical analysis of energy efficiency improvement potentials in Taiwan’s cement industry. **Energy Policy**, v. 96, p. 14–26, 2016.
- IABR. Relatório de Sustentabilidade 2020. 2021a.
- IABR. **Anuário Estatístico 2021**. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2021/07/Anuario_Completo_2021.pdf>.
- IBA. **Indústria Brasileira de Árvores - Histórico do Desempenho do Setor: Papel e Celulose**. Disponível em: <<http://iba.org/pt/biblioteca-iba/historico-do-desempenho-do-setor>>. Acesso em: 6 dez. 2017.
- IBÁ. Relatório Anual. **Indústria Brasileira de Árvores**, p. 80, 2023.
- IBGE. **Projeção da População do Brasil por sexo e idade: 2000-2060**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/projecao_da_populacao/2013/default.shtm>. Acesso em: 15 maio. 2017.

- IBGE. **PIA - Pesquisa Industrial Anual - Produto**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/industria/9044-pesquisa-industrial-anual-produto.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 24 abr. 2022a.
- IBGE. **Sistema de Contas Nacionais: Brasil**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/contas-nacionais/9052-sistema-de-contas-nacionais-brasil.html?=&t=resultados>>. Acesso em: 6 nov. 2018b.
- IEA. **Technology Roadmap: Low carbon transition in the cement industry**.
- IEA. Technology Roadmap for Cement. **International Energy Agency**, p. 66, 2018b.
- IEA. The Future of Petrochemicals – Analysis. **International Energy Agency**, p. 11–25, 2018c.
- IEA. World Energy Outlook 2019. **International Energy Agency**, 2019.
- IEA. Iron and Steel Technology roadmap : Towards more sustainable steelmaking. v. 3, p. 190, 2020a.
- IEA. Energy Policy Review - Germany 2020. **Germany 2020**, p. 1–211, 2020b.
- IEA. **Tracking Industry 2020**. Paris. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/tracking-industry-2020>>. Acesso em: 27 out. 2020c.
- IEA. **Energy Technology Perspectives 2020**. OECD, 2020d.
- IEA. **Evolving Energy Service Companies in China** **Evolving Energy Service Companies in China**.
- IEA. Recommendations of the global commission on people-centred clean energy transitions. p. 1–18, 2021b.
- IEA. **Skills Development and Inclusivity for Clean Energy Transitions**. OECD, 2022.
- IEA. **ETP Clean Energy Technology Guide**. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide>>.

IEA. **World Energy EmploymentWorld Energy Employment.**

IEA. Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5°C Goal. **International Energy Agency**, p. 1–226, 2023c.

IEA. **CO2 Capture and Utilisation.**

IEMA. **Estudo Econômico do Custo de Energia a partir de Madeira de Plantios de Eucalipto.**

INMETRO. **Conheça programa brasileiro de etiquetagem - PBE.** Disponível em: <<https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/conheca-o-programa#:~:text=O Selo CONPET de Eficiência,índices de consumo de combustível.>>. Acesso em: 19 nov. 2023.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **Statistics - Primary Aluminium Smelting Energy Intensity.** Disponível em: <<https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-smelting-energy-intensity/>>. Acesso em: 10 dez. 2023.

IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. v. Volume 3:, 2006.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report.**

IPCC. **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA.

IPCC. Annex III: Scenarios and Modelling Methods. Em: GUIVARCH, C. et al. (Eds.). **Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change.** Cambridge University Press, 2022. p. 1841–1908.

IPCC. **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate**

Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.

IPEA. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Industriais. **IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada)**, p. 67, 2012.

IRENA. **World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway, Volume 2**. Abu Dhabi.

KARALI, N.; XU, T.; SATHAYE, J. Reducing energy consumption and CO₂ emissions by energy efficiency measures and international trading : A bottom-up modeling for the U.S. iron and steel sector. **Applied Energy**, v. 120, p. 133–146, 2014.

KERMELI, K. et al. Energy efficiency improvement and GHG abatement in the global production of primary aluminium. **Energy Efficiency**, 2014.

KNOP, K.; HALLIN, M.; BURSTROM, E. **ULCORED SP 12 Concept for minimized CO₂ emissions**.

L. LA ROVERE, E. et al. **Policy lessons on deep decarbonization in large emerging economies: Brazil**. Disponível em: <https://ddpinitiative.org/wp-content/pdf/DDP_BIICS_CountryReport_BRA.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2024.

LA ROVERE, E. L. The potential contribution of emerging economies to stop dangerous climate change. The case of Brazil. **WIREs Climate Change**, n. March, p. 1–5, 2019.

LA ROVERE, E. L. et al. **Policy Lessons on Deep Decarbonization in Large Emerging Economies, Brazil**. Paris.

LA ROVERE, E. L.; GROTTERRA, C.; WILLS, W. Overcoming the financial barrier to a low emission development strategy in Brazil. **International Economics**, v. 155, p. 61–68, 2018.

LAMAS, W. D. Q.; PALAU, J. C. F.; CAMARGO, J. R. DE. Waste materials co-processing in cement industry: Ecological efficiency of waste reuse. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 200–207, 2013.

- LANGTANGEN, H. P. Python Scripting for Computational Science. **Python Scripting for Computational Science**, 2008.
- LEE, H. et al. A bottom-up model of industrial energy system with positive mathematical programming. **Energy**, v. 173, p. 679–690, 2019.
- LENZ, V. et al. Status and Perspectives of Biomass Use for Industrial Process Heat for Industrialized Countries. **Chemical Engineering & Technology**, v. 43, n. 8, p. 1469–1484, 12 ago. 2020.
- LIU, X.; FAN, Y.; LI, C. Carbon pricing for low carbon technology diffusion : A survey analysis of China ' s cement industry. **Energy**, v. 106, p. 73–86, 2016.
- LUND, H. et al. Simulation versus optimisation: Theoretical positions in energy system modelling. **Energies**, v. 10, n. 7, p. 1–17, 2017.
- MA, D. et al. Quantifying the co-benefits of decarbonisation in China's steel sector: An integrated assessment approach. **Applied Energy**, v. 162, p. 1225–1237, 2016.
- MADLOOL, N. A. et al. A critical review on energy use and savings in the cement industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 4, p. 2042–2060, 2011.
- MADLOOL, N. A. et al. An overview of energy savings measures for cement industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 18–29, 2013.
- MASSARENTE, M. et al. Alumínio No Brasil : Transformações Nos Últimos 15 Anos. p. 1–2, 2021.
- MCFADDEN, D. Conditional logit analysis of qualitative choice behavior. 1973.
- MCFADDEN, D. **Disaggregate behavioral travel demand's RUM side**.
- MCKINSEY & COMPANY. Hidrogênio verde: uma oportunidade de geração de riqueza com sustentabilidade, para o Brasil e o mundo. 2021.
- MCTI. **SIRENE**. Sistema Nacional de Registro de Emissões (SIRENE), 2023.

MCTIC. QUARTO INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSÕES E REMOÇÕES ANTRÓPICAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA - RELATÓRIO DE REFERÊNCIA SETOR - SETOR DE PROCESSOS INDUSTRIAIS E USO DE PRODUTOS. 2020.

MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE. **Opções de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) em Setores-Chave do Brasil.**

MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE. **Modelagem Setorial De Opções De Baixo Carbono Para O Setor Químico.** Brasília. Disponível em: <www.mcti.gov.br>.

MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE. **Modelagem Setorial De Opções De Baixo Carbono Para O Setor De Mineração e Pelotização.**

MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE. **Modelagem Setorial De Opções De Baixo Carbono Para O Setor Têxtil.**

MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE. **Modelagem Setorial De Opções De Baixo Carbono Para O Setor De Alimentos E Bebidas.**

MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE. **Modelagem Setorial De Opções De Baixo Carbono Para O Setor De Cerâmica.**

MIDREX. Optimizing DRI production using natural gas. 2018.

MIDREX. World Direct Reduction Statistics - 2018. 2019.

MILANEZ, B. **MINERAÇÃO, AMBIENTE E SOCIEDADE: IMPACTOS COMPLEXOS E SIMPLIFICAÇÃO DA LEGISLAÇÃO.**

MILFORD, R. L. et al. The roles of energy and material efficiency in meeting steel industry CO₂ targets. **Environmental Science and Technology**, v. 47, n. 7, p. 3455–3462, 2013.

MILLER, S. A.; HORVATH, A.; MONTEIRO, P. J. M. Readily implementable techniques can cut annual CO₂ emissions from the production of concrete by over 20%. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 7, 2016.

MINISTÉRIO DA FAZENDA. Medidas Estruturais de Crédito. 2023.

MMA. **Plano nacional de resíduos sólidos.**

MME. **Anuário estatístico do setor metalúrgico 2019.** Brasília, DF.

MORCEIRO, P. C. **A indústria brasileira no limiar do século XXI: uma análise da sua evolução estrutural, comercial e tecnológica.** Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

MORFELDT, J.; NIJS, W.; SILVEIRA, S. The impact of climate targets on future steel production - An analysis based on a global energy system model. **Journal of Cleaner Production**, v. 103, p. 469–482, 2015.

MORROW, W. R. et al. Assessment of energy efficiency improvement and CO2 emission reduction potentials in India's cement and iron & steel industries. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 131–141, 2014.

MOYA, J. A.; PARDO, N. The potential for improvements in energy efficiency and CO2 emissions in the EU27 iron and steel industry under different payback periods. **Journal of Cleaner Production**, v. 52, p. 71–83, 2013.

NATIONAL MINERALS INFORMATION CENTER. **U.S. Geological Survey - Mineral Commodity Summaries - Iron ore** **Mineral Commodity Summaries.** Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-iron-ore.pdf>>.

NATURAL RESOURCES CANADA. **The Canadian critical minerals strategy, from exploration to recycling: Powering the green and digital economy for Canada and the world.**

NETHERLANDS ENTERPRISE AGENCY. **Stimulation of sustainable energy production and climate transition (SDE++).**

- NREL. **Python Opens Up New Applications for EnergyPlus Building Energy Simulation**. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/news/features/2022/python-opens-up-new-applications-for-energyplus-building-energy-simulation.html>>.
- OBRIST, M. D. et al. Decarbonization pathways of the Swiss cement industry towards net zero emissions. **Journal of Cleaner Production**, v. 288, p. 125413, 2021.
- OBRIST, M. D. et al. Long-term energy efficiency and decarbonization trajectories for the Swiss pulp and paper industry. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 52, n. PA, p. 101937, 2022.
- OLIPHANT, T.; MILLMA, J. K. A guide to NumPy. **Trelgol Publishing**, 2006.
- OLIVEIRA, C. C. N. et al. Bio-ethylene from sugarcane as a competitiveness strategy for the Brazilian chemical industry. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 14, n. 2, p. 286–300, 2020a.
- OLIVEIRA, C. C. N. et al. Bio-ethylene from sugarcane as a competitiveness strategy for the Brazilian chemical industry. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 14, n. 2, p. 286–300, 9 mar. 2020b.
- OLSSON, O.; SCHIPFER, F. **Decarbonizing industrial process heat: the role of biomass**.
- OTTO, A. et al. Power-to-steel: Reducing CO₂ through the integration of renewable energy and hydrogen into the German steel industry. **Energies**, v. 10, n. 4, 2017.
- PACHECO, D. **Após recorde de fuga de cérebros, Brasil precisa voltar a atrair profissionais**.
- PANDAS. **About pandas**. Disponível em: <<https://pandas.pydata.org/about/index.html>>.
- PAOLI, L.; LUPTON, R. C.; CULLEN, J. M. Useful energy balance for the UK: An uncertainty analysis. **Applied Energy**, v. 228, n. June, p. 176–188, 2018.
- PARDO, N.; MOYA, J. A. Prospective scenarios on energy efficiency and CO₂ emissions in the European Iron & Steel industry. **Energy**, v. 54, p. 113–128, 2013.

- PARDO, N.; MOYA, J. A.; MERCIER, A. Prospective on the energy efficiency and CO₂ emissions in the EU cement industry. **Energy**, v. 36, n. 5, p. 3244–3254, 2011.
- PEARCE, D.; TURNER, K. **Economics of Natural Resources and the Environment**. John Hopkins University Press, 1990.
- PIKETTY, M. G. et al. Assessing land availability to produce biomass for energy: The case of Brazilian charcoal for steel making. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 2, p. 180–190, 1 fev. 2009.
- PINTO, R. G. D.; SZKLO, A. S.; RATHMANN, R. CO₂ emissions mitigation strategy in the Brazilian iron and steel sector–From structural to intensity effects. **Energy Policy**, v. 114, n. June 2017, p. 380–393, 2018a.
- PINTO, R. G. D.; SZKLO, A. S.; RATHMANN, R. CO₂ emissions mitigation strategy in the Brazilian iron and steel sector–From structural to intensity effects. **Energy Policy**, v. 114, n. November 2017, p. 380–393, 2018b.
- PIOTTO, Z. C. **Eco-eficiência na Indústria de Celulose e Papel - Estudo de Caso**. Universidade de São Paulo, 2003.
- PRINA, M. G. et al. Classification and challenges of bottom-up energy system models - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 129, p. 109917, 2020.
- PROCEL. **PROCEL INDÚSTRIA - Eficiência Energética Industrial**. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/data/Pages/LUMIS623FE2A5ITEMID5758021DED A0411490D62106E1491EBEPTBRIE.htm>>. Acesso em: 9 dez. 2017.
- REHFELDT, M. et al. Fuel switching as an option for medium-term emission reduction - A model-based analysis of reactions to price signals and regulatory action in German industry. **Energy Policy**, v. 147, n. August, p. 111889, 2020.
- REHFELDT, M.; FLEITER, T.; WORRELL, E. Inter-fuel substitution in European industry: A random utility approach on industrial heat demand. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 98–110, 2018.

- REN, L. et al. A review of CO₂ emissions reduction technologies and low-carbon development in the iron and steel industry focusing on China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 143, n. January, p. 110846, 2021.
- RESPONSIBLE STEEL. **ResponsibleSteel Certification**. Disponível em: <<https://www.responsiblesteel.org/become-certified>>. Acesso em: 19 maio. 2024.
- REUTERS. **Sweden's H2 Green Steel raises \$5.2 bln in new funding**.
- RIBEIRO, T. R. et al. Revisão De Patentes De Processos De Redução Direta. p. 995–1006, 2015.
- RISSMAN, J. et al. Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070. **Applied Energy**, v. 266, n. November 2019, p. 114848, 2020.
- ROCHA, S. S. **ANÁLISE COMPARATIVA DOS BENEFÍCIOS ECONÔMICOS, OPERACIONAIS E AMBIENTAIS DO MÉTODO TERRACE MINING NA MINERAÇÃO DE GIPSITA DO POLO GESSEIRO DO ARARIPE**. Universidade Federal de Pernambuco, 2017.
- ROCHEDO, P. R. R. et al. Carbon capture potential and costs in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 131, p. 280–295, 2016.
- ROCHEDO, P. R. R. **DEVELOPMENT OF A GLOBAL INTEGRATED ENERGY MODEL TO EVALUATE THE BRAZILIAN ROLE IN CLIMATE CHANGE MITIGATION SCENARIOS**. UFRJ, 2016.
- ROJAS-CARDENAS, J. C. et al. Energy efficiency in the Mexican iron and steel industry from an international perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 158, p. 335–348, 2017.
- RYAN, D.; PLOURDE, A. Empirical modelling of energy demand. Em: **International Handbook on The Economics of Energy**. Cheltenham: Edward Elgar, 2009. p. 112–143.

SALMENZAARI, T. Heat-only biomass boiler plant investment cost estimation model based on real boiler plant projects. 2021.

SALUM, F.; COLETA, K. Alumínio no Brasil: a transformação na dinâmica de consumo e produção do Alumínio no país. **Estudo setorial**, 2020.

SBTI. **Net Zero Standards**.

SEBRAE. A INDÚSTRIA DE ALIMENTOS E BEBIDAS BRASILEIRA : suprindo o mercado interno e conquistando o mundo. p. 1–6, 2023.

SEBRAE; FGV. Atualização De Estudo Sobre Participação De Micro E Pequenas Empresas Na Economia Nacional. **SebraeData**, p. 1–63, 2020.

SEEG. **SEEG - Sistema de Estimativa de Emissão de Gases**. Disponível em: <<http://plataforma.seeg.eco.br/sectors/energia>>. Acesso em: 16 maio. 2019.

SILVA, M. L. DA et al. O SETOR INDUSTRIAL BRASILEIRO: DESAFIOS E OPORTUNIDADES. **RDE - Revista de Desenvolvimento Econômico**, v. 2, n. 43, p. 28–54, 2019.

SINDIFER. Anuário estatístico. 2021.

SNIC. **Roadmap tecnológico do cimento**.

SNIC. **SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO DIRETORIA - RELATÓRIO ANUAL 2019**.

SNIC. **Números - Dados do setor**. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>>. Acesso em: 18 maio. 2019.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Números: dados do setor**. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>>. Acesso em: 5 dez. 2017.

- SOKI, E. A. **Mercado de crédito MPEs - falhas e Fintechs.** Escola nacional de Administração Pública - ENAP, 2019.
- STAHL. **Introduction of a Low Emission Steel Standard (LESS) to support the transformation of the steel industry.** Berlim.
- STIGLITZ, J. et al. **Report of the High-Level Commission on Carbon Prices I.** Disponível em: <www.carbonpricingleadership.org>.
- TALAEI, A. et al. Assessment of long-term energy efficiency improvement and greenhouse gas emissions mitigation options for the cement industry. **Energy**, v. 170, p. 1051–1066, 2019.
- TALAEI, A.; AHIDUZZAMAN, M.; KUMAR, A. Assessment of long-term energy efficiency improvement and greenhouse gas emissions mitigation potentials in the chemical sector. **Energy**, v. 153, p. 231–247, 2018.
- TECNORED. **Sustainability – TecnoRed.** Disponível em: <<https://www.tecnored.com.br/en/sustainability/>>. Acesso em: 9 out. 2021.
- TENOVA HYL. Energiron - DRI Technology. p. 52, 2014.
- THE WORLD BANK. **Manufacturing, value added (constant 2010 US\$) - Brazil | Data.** Disponível em: <<https://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.MANF.KD?end=2020&locations=BR&start=2002>>. Acesso em: 30 jul. 2021.
- THIEL, G. P.; STARK, A. K. **To decarbonize industry, we must decarbonize heat.** JouleCell Press, , 17 mar. 2021.
- TOLMASQUIM, M.; SZKLO, A.; SOARES, J. **Mercado de gás natural na indústria química e no setor hospitalar do Brasil.** Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE.
- TONG, D. et al. Committed emissions from existing energy infrastructure jeopardize 1.5 °C climate target. **Nature**, v. 572, n. 7769, p. 373–377, 1 ago. 2019.

TORO GONZÁLEZ, J. IGNÁCIO. **Proposta de precificação das emissões de Gases de Efeito Estufa no Setor Elétrico Brasileiro por meio de sistema de comércio de emissões.** Universidade de São Paulo, 2020.

TRAIN, K. **Discrete choice methods with simulation.** New York: Cambridge university press, 2009.

UNEP. **Emissions Gap Report 2023: Broken Record – Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again).** Nairobi: United Nations Environment Programme, 2023.

UNFCCC. **Paris Agreement.**

UNFCCC. **Mitigation benefits and co-benefits of policies, practices and actions for enhancing mitigation ambition: implementation of circular economies with a focus on waste- to-energy technologies and on industrial waste reuse and prevention solutions.**

UNIÃO EUROPEIA. **REGULAMENTO (UE) 2023/1115 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO.** Parlamento Europeu, , 2023.

UNIDO. **Barriers to industrial energy efficiency: a literature review. United Nations Industrial Development Organisation,** p. 98 pp., 2011.

UNIDO. **IDDI GREEN PUBLIC PROCUREMENT PLEDGE ANNOUNCEMENT.** , 2023.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Barriers to industrial energy efficiency: report to Congress.** n. June, p. June, 2015.

USDOE. **Inflation Reduction Act 2022.**

USGS. **Cement Statistics and Information.**

- USÓN, A. A. et al. Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 242–260, 2013.
- VAISBERG, L. A.; MIKHAILOVA, N. V.; GERASIMOV, A. M. Fuel from municipal solid waste for the cement industry. **Solid Fuel Chemistry**, v. 51, n. 1, p. 57–65, 2017.
- VALE. **Vale inicia em Marabá (PA) obra da primeira planta comercial da Tecnored, que contribuirá com descarbonização da siderurgia.** Disponível em: <<https://vale.com/pt/w/vale-inicia-em-maraba-pa-obra-da-primeira-planta-comercial-da-tecnored-que-contribuira-com-descarbonizacao-da-siderurgia>>. Acesso em: 28 nov. 2023.
- VAN BEECK, N. Classification of energy models. 1999.
- VAN RUIJVEN, B. J. et al. Long-term model-based projections of energy use and CO2 emissions from the global steel and cement industries. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 112, p. 15–36, 2016.
- VASCONCELOS, I.; CASTELO, A. M. Impactos da crise nas empresas da construção. **Conjuntura da Construção**, p. 9–11, 2015.
- VOGL, V.; ÅHMAN, M.; NILSSON, L. J. Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. **Journal of Cleaner Production**, v. 203, p. 736–745, 2018.
- VOGL, V.; OLSSON, O.; NYKVIST, B. Phasing out the blast furnace to meet global climate targets. **Joule**, v. 5, n. 10, p. 2646–2662, 2021.
- WANG, R. R. et al. Hydrogen direct reduction (H-DR) in steel industry—An overview of challenges and opportunities. **Journal of Cleaner Production**, v. 329, n. November, p. 129797, 2021.
- WATSON, J. Pyomo - Optimization Modelling in Python. 2018.

WEST, K. J.; DE JONGE, J. J.; VAN HOUT, M. **DECARBONISATION OPTIONS FOR THE DUTCH POTATO PROCESSING INDUSTRY**. n. June, 2021.

WILLS, W. et al. Economic and social effectiveness of carbon pricing schemes to meet Brazilian NDC targets. **Climate Policy**, p. 1–16, 2021.

WMO. **WMO confirms that 2023 smashes global temperature record**. Disponível em: <<https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2023-smashes-global-temperature-record>>. Acesso em: 3 jan. 2024.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Cement Technology Roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050**. p. 36, 2009.

WORLD ECONOMIC FORUM. **Green Public Procurement: Catalysing the Net-Zero Economy**. Genebra.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **World steel in figures**. v. 2021, 2021.

WORRELL, E. et al. **Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the U . S . Iron and Steel Industry**. Berkeley, CA.

WORRELL, E.; BOYD, G. Bottom-up estimates of deep decarbonization of U.S. manufacturing in 2050. **Journal of Cleaner Production**, v. 330, n. November 2021, p. 129758, 2022.

WORRELL, E.; GALITSKY, C. **Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for cement making**. Ernest Orlando Lawrence. Berkeley National Laboratory. Na **Energy Star Guide for Energy and Plant Managers**. Environmental Energy Technologies Division. California.

WORRELL, E.; KERMELI, K.; GALITSKY, C. **Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making**. Disponível em: <<https://www.energystar.gov/ia/business/industry/LBNL-54036.pdf>>.

- XU, J. H.; YI, B. W.; FAN, Y. A bottom-up optimization model for long-term CO₂ emissions reduction pathway in the cement industry: A case study of China. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 44, p. 199–216, 2016.
- ZHANG, Q. et al. Waste energy recovery and energy efficiency improvement in China's iron and steel industry. **Applied Energy**, v. 191, p. 502–520, 2017.
- ZHANG, S. et al. Exploring selected pathways to low and zero CO₂ emissions in China's iron and steel industry and their impacts on resources and energy. **Journal of Cleaner Production**, v. 340, n. February, p. 130813, 2022.
- ZIERI, W.; ISMAIL, I. Alternative Fuels from Waste Products in Cement Industry. Em: MARTINEZ, L.; KHARISSOVA, O.; KHARISOV, B. (Eds.). **Handbook of Ecomaterials**. Springer, 2019.
- ZUBERI, M. J. S.; PATEL, M. K. Bottom-up analysis of energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction potentials in the Swiss cement industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 4294–4309, 2017.

Apêndice A

A1. Ferro-gusa e Aço

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2020c), a indústria siderúrgica é responsável por aproximadamente 8% na demanda global final de energia. Devido ao elevado consumo de energia, em especial o carvão mineral, este setor corresponde a uma das principais fontes de gases de efeito estufa (GEE), correspondendo a 7% das emissões globais de CO2 relacionadas à energia.

No mundo, a China concentra a maior parte da produção de aço, com 57% da produção de 2020 totalizando 1.064 Mt, valor 10 vezes maior que o segundo maior produtor, Índia. A produção brasileira de aço é a nona maior do mundo, com aproximadamente 31 milhões de toneladas de aço fabricados em 2020 e dentro da América Latina, o país responde por 51% de todo aço produzido anualmente.

Tabela 45 - Produção de aço por país em 2020

País	Produção (Mt)
China	1.064
Índia	100
Japão	83
Estados Unidos	72
Rússia	71
Coreia do Sul	67
Turquia	35
Alemanha	35,70
Brasil	31,00
Outros países	315,30

Fonte: elaboração própria a partir de WORLD STEEL ASSOCIATION (2021)

No Brasil, a indústria de aço se concentra, majoritariamente na região sudeste: 31% no estado de Minas Gerais, 29% no Rio de Janeiro e 17% no Espírito Santo. Além disso, 6 empresas são responsáveis por quase 90% de toda produção de aço no Brasil: ArcelorMittal (28%), Gerdau (20%), Ternium (13%), Companhia Siderúrgica Nacional - CSN (12%), Usiminas (9%) e Companhia Siderúrgica do Pecém - CSP (9%) (IABR, 2021b, 2021a)

Ao longo dos últimos 15 anos, a produção de aço manteve-se próxima ao patamar entre 30 e 35 Mt de aço por ano (Figura 32). Com destaque para a queda para a produção em 2009, fruto da crise econômica global, com uma segunda queda em 2019 fruto de uma lenta retomada da economia e intensificado pela pandemia da COVID-19 (AGÊNCIA BRASIL, 2021).

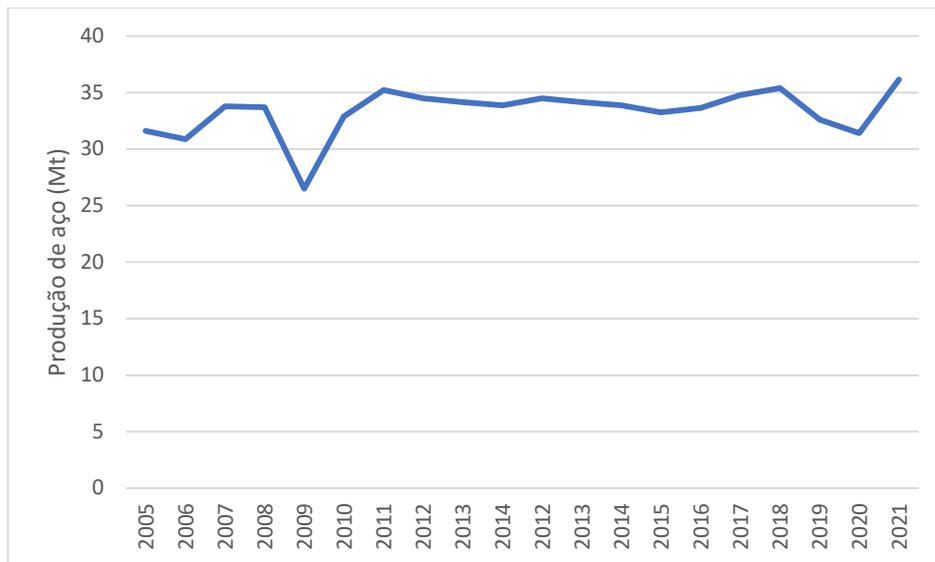


Figura 32 -Produção de aço no Brasil entre 2005 e 2023
Fonte: Elaboração própria com base em IABR (2021b)

Processo produtivo

Os dois principais processos de fabricação de aço no mundo e no Brasil são o Alto-Forno - Forno Básico de Oxigênio (BF-BOF) e o Forno a Arco Elétrico (EAF) (FAN; FRIEDMANN, 2021) (Figura 33). O BF-BOF é o processo mais intensivo em energia e responde por 70% da produção global de aço. Ele utiliza minério de ferro, carvão ou carvão vegetal e calcário como matérias-primas. O EAF, por outro lado, utiliza sucata e eletricidade como principais insumos. Este processo tem menor consumo de energia e pode ter uma intensidade de emissão significativamente menor do que o BF-BOF, se a eletricidade utilizada for proveniente de fonte renovável (EPE, 2018a).

Outra rota de produção relevante é a Produção Independente de Ferro-Gusa, menos eficiente do que a produção integrada. Cerca de 30 milhões de toneladas de ferro-gusa foram produzidas por ano no Brasil entre 2010 e 2020, sendo que 24% desta produção é proveniente de produtores independentes, chamados de “guseiros”.

No Brasil a principal rota de produção é a integrada com aciarias a oxigênio (BF-BOF) e com forno a arco elétrico (EAF), com 15 usinas que utilizam a primeira tecnologia e 16 a segunda (IABR, 2021b). O percentual de aço produzido por cada uma delas é de 75% com BOF e 24% EAF.

Um grande destaque para siderurgia brasileira é a utilização de carvão vegetal como agente redutor do minério de ferro (HEBEDA et al., 2023; IABR, 2021a). 11% da produção nacional de aço é utiliza este combustível renovável. Atualmente, a maior parte do carvão vegetal consumido pelas indústrias são provenientes de plantações próprias (84%), 13 % são fornecidos por terceiros e 2% são resíduos florestais.

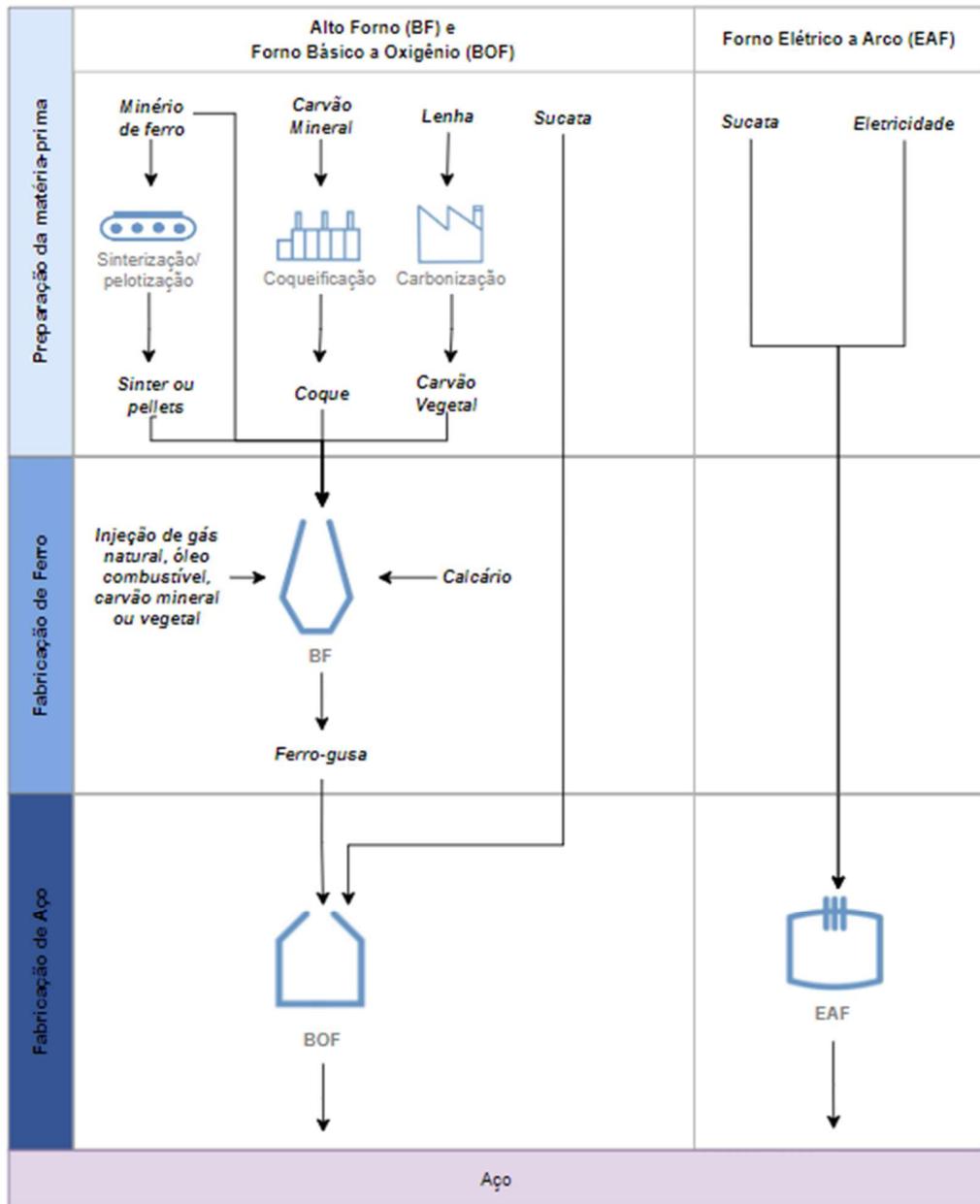


Figura 33 - Fluxograma da produção de aço a partir de tecnologias tradicionais

Fonte: elaboração própria com base em FAN; FRIEDMANN (2021)

BF-BOF

A maior parcela, cerca de 70%, do aço produzido no mundo é feita através das tecnologias de alto-forno (*Blast Furnace* – BF) com aciarias a oxigênio (*Basic Oxygen*

Furnace). Esta rota tecnológica tem como principais matérias primas o minério de ferro, carvão e calcário. Este processo inicia-se pelas etapas de coqueificação, onde o carvão mineral é convertido em coque, e sinterização, onde a carga de minério de ferro é preparada. Em seguida, os alto-fornos são alimentados com o coque e sinter, onde acontecerá a redução do minério de ferro, transformando-o em ferro-gusa. A última etapa de transformação acontece nas aciarias do oxigênio (BOF), onde oxigênio é injetado reduzindo a quantidade de carbono no ferro-gusa produzindo o aço. Por fim, o aço passa por processos de finalização para se tornar o produto, como até produtos acabados como placas, chapas, bobinas, lingotes, blocos, tarugos, barras entre outro. Em termos energéticos, o processo BF-BOF consome aproximadamente 21 GJ por aço produzido e gera cerca de 2,2 tCO₂e (HASANBEIGI; SPRINGER, 2019).

EAF

A segunda rota de produção mais relevante é a que utiliza fornos a arco elétrico (*electric arc furnance* – EAF) com cerca de 25-30% de toda a produção mundial (FAN; FRIEDMANN, 2021). Nesta rota de produção, as principais matérias primas utilizadas são sucata e eletricidade.

Em relação ao consumo energético, esta tecnologia possui intensidade inferior à rota BF-BOF, com cerca de 9,0 GJ consumidos por aço produzido, aproximadamente metade quando comparada a rota tradicional. Além disso, por utilizar majoritariamente eletricidade, esta tecnologia possui intensidade de emissão de 0,4-1,1 tCO₂e por aço produzido, o que representa pelo menos metade da intensidade da rota BF-BOF (Hasanbeigi and Springer, 2019).

Perfil energético e emissões

O consumo de energia da indústria de aço ocupa posição de destaque, respondendo por 6% do consumo energético do país e 20% do setor industrial. Em relação as emissões do setor, a produção de aço é responsável pela maior parcela das emissões industriais, com aproximadamente 30% das emissões totais do setor.

Em comparação com o resto do mundo, o aço brasileiro possui intensidade de emissões 25% inferior, com uma intensidade de emissões de 1,5 tCO₂e/t aço (CENTRO

CLIMA; TALANOVA INSTITUTE, 2021) *versus* 2,0 tCO₂e/t aço da média global ((HASANBEIGI; SPRINGER, 2019).

Assim como na produção, o consumo energético do setor não apresentou grandes variações entre 2005 e 2022 (Figura 34). Ao longo do período, a demanda de energia permaneceu próxima a 16.000 ktep, com uma queda acentuada em 2009.

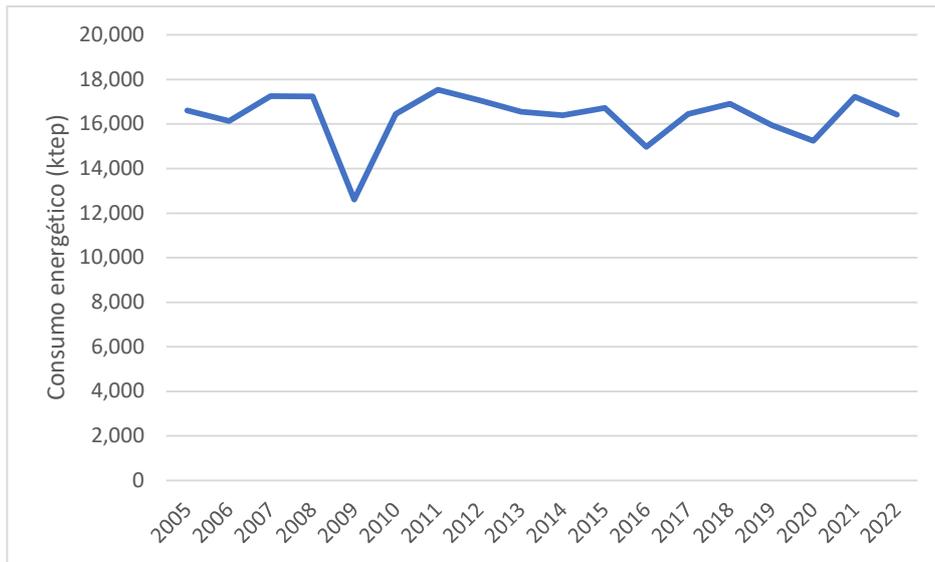


Figura 34 - Consumo energético da indústria de ferro-gusa e aço no Brasil entre 2005 e 2022
Fonte: elaboração própria com base em EPE (2023b)

A matriz energética do setor siderúrgica brasileira é composta por três fontes principais, o coque de carvão mineral, responsável por 42% do total, seguido de carvão vegetal com 18% e de eletricidade com 10% (Figura 35). Esta estatística destaca a indústria brasileira de aço pelo seu elevado grau de renovabilidade energética, o que coloca o setor em uma posição de vanguarda em relação a substituição de combustíveis fósseis.

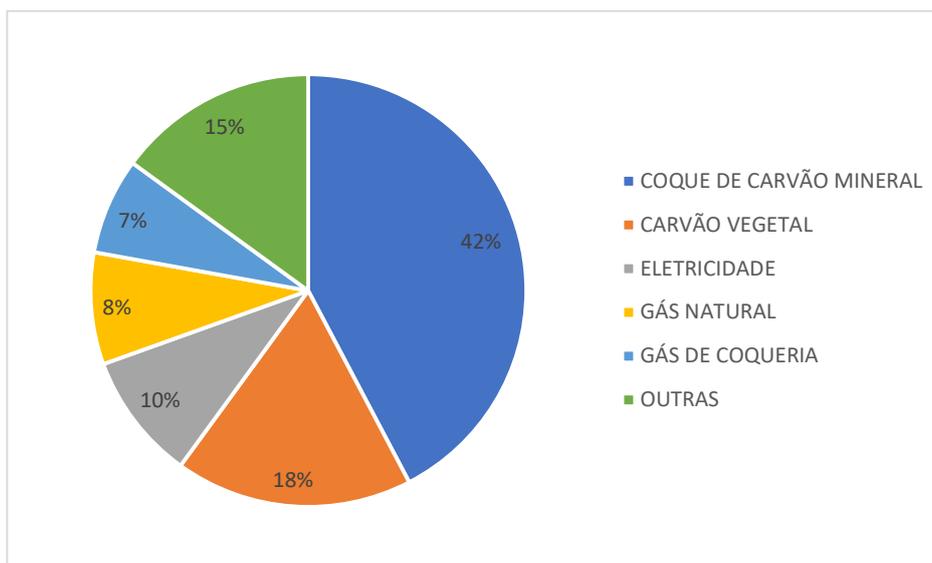


Figura 35 - Matriz energética da produção de ferro-gusa e aço no Brasil
 Fonte: elaboração própria com base em EPE (2023)

A2. Cimento

A produção de cimento é uma atividade intensiva em energia; são demandados cerca de 4,0 GJ de energia para produzir uma tonelada deste material (MADLOOL et al., 2011, 2013). A indústria de cimento é uma das maiores consumidoras de energia do mundo com aproximadamente 10-15% da demanda total do setor industrial e respondem por 9% das emissões de gases de efeito estufa (IEA, 2020c; MILLER; HORVATH; MONTEIRO, 2016; ZIERI; ISMAIL, 2019)

A produção de cimento cresceu 25% desde 2010, atingindo o marco de mais de 4.000 Mt em 2020, o que corresponde ao material mais consumido no mundo (IEA, 2019). Considerando o aumento da população mundial e o aumento da urbanização, é esperado que este comportamento deverá se manter nos próximos anos. De acordo com a IEA, a produção de cimento deverá aumentar 14% até 2050.

Processo produtivo

A fabricação de cimento pode ser feita através de dois processos, um por via seca e outro por via úmida, a depender do teor de umidade que entra no forno. Sendo que este último há um consumo maior de energia dado que é necessária mais energia para evaporar a água contida na mistura. O processo para fabricar cimento, pode ser desagregado em três estágios

principais: (i) preparação da matéria-prima, (ii) fabricação de clínquer, e (iii) moagem e mistura. Por sua vez, estes estágios podem ser expandidos em 10 etapas, apresentados na Figura 36.

Primeiramente, (1) ocorre a extração de matérias primas as matérias-primas, calcário e argila, que proverão o carbonato de cálcio, substância central do cimento. Normalmente, este processo de extração ocorre próximo a planta de cimento. Outros materiais também podem ser utilizados para melhorar as qualidades do cimento, como areia, minério de ferro, bauxita. Em seguida (2), a matéria-prima é moída para atingir a granulometria adequada (menor que 10 cm) e transportada para planta de cimento. Este material é misturado (3) para atingir a composição química adequada em uma etapa chama da de pré-homogeneização.

O pré-aquecimento (4) é formado por uma série de ciclones verticais por onde a matéria-prima percorre. Neste processo, o material entra em contato com os gases de exausto oriundos do forno, que fluem em contrafluxo, aumentando a temperatura do conteúdo para 900°C. Em seguida, este material é transportado para uma câmara de combustão onde se dá início a pré-calцинаção (5), etapa onde acontece a maior parte das emissões: uma parte, pela queima de combustíveis para geração de energia e outra pela calcinação, reação química representada pela dissociação do calcário (CaCO_3) gerando cal (CaO) e CO_2 . O produto desta etapa, a farinha pré-calcinada, é levada até os fornos rotativos, que possuem uma rotação de cerca de três a cinco vezes por minuto transportando o material e onde são queimados os combustíveis, cuja temperatura de operação chega a 1.500 °C. Este calor é responsável por transformar a farinha pré-calcinada no clínquer, produto intermediário da produção de cimento. O clínquer que egressa dos fornos é resfriado (7) e misturado com gesso e outras adições para formação do cimento Portland (8), o principal tipo de cimento utilizado pelo setor. Por fim, o cimento é moído por moinhos de bola (9) para se transformar em um pó cinza, conhecido como Cimento Portland (CP). Por fim é homogeneizado e armazenado em silos para ser despachado (10).

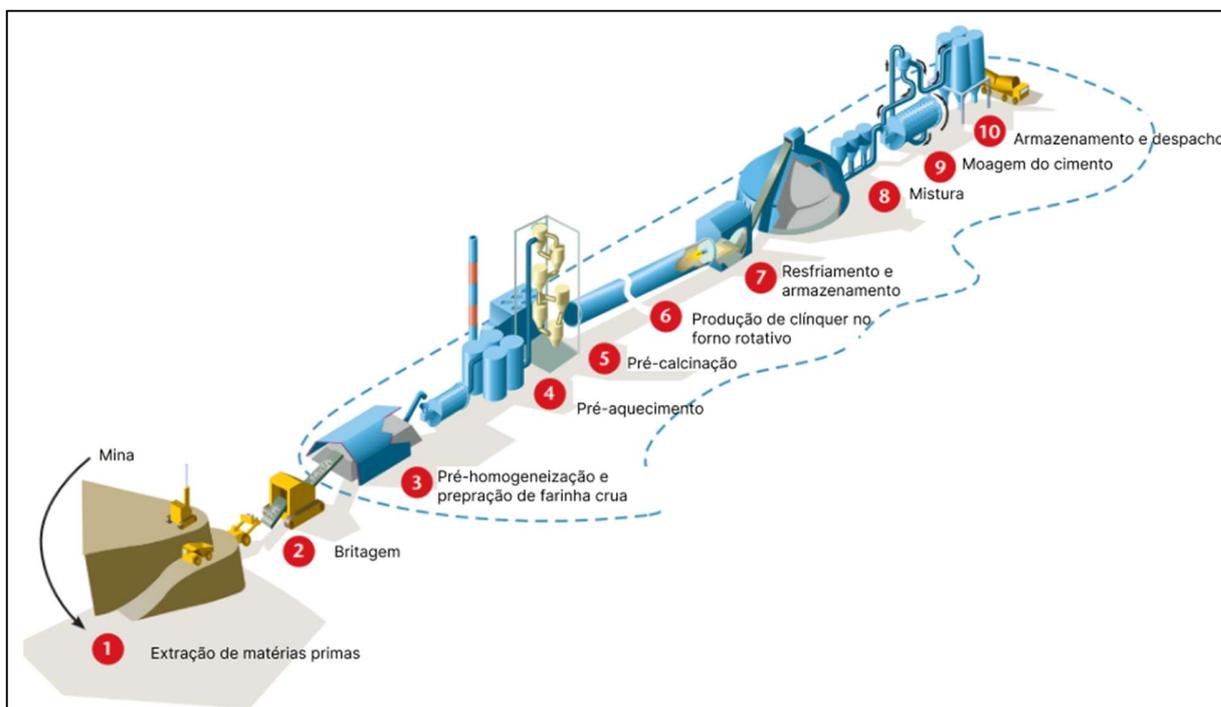


Figura 36 - Esquema de uma típica planta de cimento
 Fonte: elaboração própria com base em IEA (2018a)

Caracterização do setor no Brasil

A produção nacional é formada por 93 plantas de cimento controlada por 23 grupos industriais com uma capacidade de produção anual de, aproximadamente, 94 milhões de toneladas de cimento (SNIC, 2022). Durante o período entre 2005 e 2014 houve um crescimento constante da produção de cimento no Brasil (Figura 37). O crescimento econômico do país neste período, junto com a expansão imobiliária, programas de moradia como o Minha Casa, Minha Vida e as grandes obras de infraestrutura, que receberiam eventos internacionais como a Copa do Mundo e as Olimpíadas, contribuíram para o crescimento da produção de cimento no país. No período citado a quantidade de cimento produzida anualmente dobrou, partindo de 36,7 Mt para 71,3 Mt.

Em 2014, a crise político-econômica trouxe grandes impactos para a indústria, em especial para o setor de construção civil, um dos mais afetados. O setor que fora responsável por 6% do PIB brasileiro no ano da Copa do Mundo, viu sua participação despencar nos anos seguintes, chegando ao nível de 3,7% (VASCONCELOS; CASTELO, 2015). Esta crise econômica teve impacto direto na produção de cimento, que viu seu nível de atividade retrair

ano após ano chegando ao menor nível em 2018, atingindo o mesmo patamar de 2010, próximo a 53 Mt de cimento. Com a retomada da atividade econômica a partir de 2019, o setor começou a se recuperar. Hoje, sua produção é semelhante aos níveis de 2011, próximo a 63 Mt de cimento por ano.

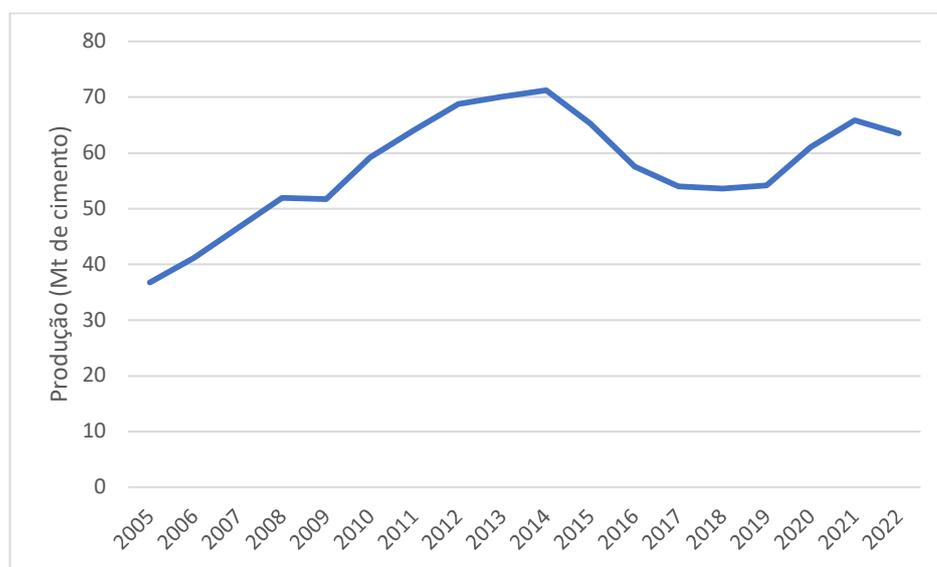


Figura 37 - Produção de cimento entre 2005 e 2022
Fonte: elaboração própria com base em SNIC (2017)

Perfil energético e de emissões

Nos últimos 15 anos houve uma evolução do parque industrial da indústria de cimento no Brasil (Figura 38) (SNIC, 2019). Novas instalações foram construídas para expandir a capacidade produtiva do país, com tecnologias modernas e eficientes como pré-aquecedores, pré-calcinadores além de retrofits nas unidades já existentes. Isto fez com que o consumo específico de energia do setor reduzisse 16% entre 1990 e 2020, partindo de 4.2 GJ/t clínquer para 3.5 GJ/t clínquer. Com este valor, a indústria brasileira se encontra no mesmo nível da

média global, mas ainda abaixo dos valores médios dos países europeus, cujo consumo específico totaliza 3.7 GJ/t clínquer (SNIC, 2020).

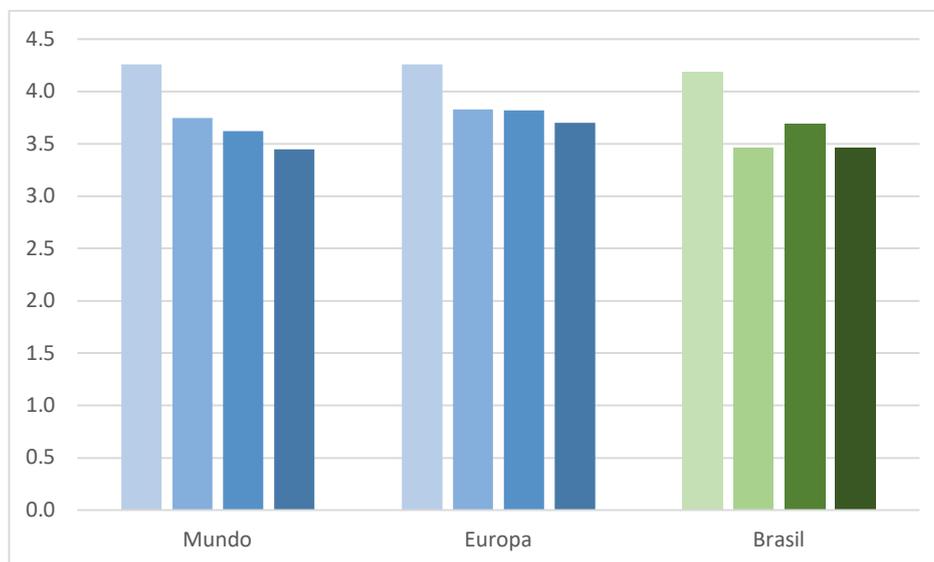


Figura 38 - Consumo específico da produção de cimento em GJ/t no mundo, Europa e Brasil entre 1990 e 2020

Fonte: elaboração própria com base em(SNIC, 2017)

No Brasil, a principal fonte de energia que se destaca na matriz do setor de cimento é o coque de petróleo, com cerca de 58% da demanda total do setor (Figura 39). Em segundo lugar, aparece um combustível intitulado como “Outros” no Balanço Energético Nacional (EPE, 2022). Apesar da falta de detalhamento no relatório estatístico da EPE, a partir de dados da SNIC pode-se compreender o que é agrupado nesta categoria. De acordo com a SNIC (SNIC, 2019), 10% da demanda de energia do setor é proveniente de resíduos como resíduos industriais (4%), pneus (5%) e resíduos agrícolas (1%). A fins de comparação, a média global utiliza aproximadamente 20% de combustíveis alternativos (biomassa e resíduos) em sua matriz, enquanto no Brasil este percentual é de, aproximadamente, 30%, uma das maiores taxas do mundo, ficando atrás do continente europeu, cujo percentual de fontes renováveis na matriz energética é maior que 45%.

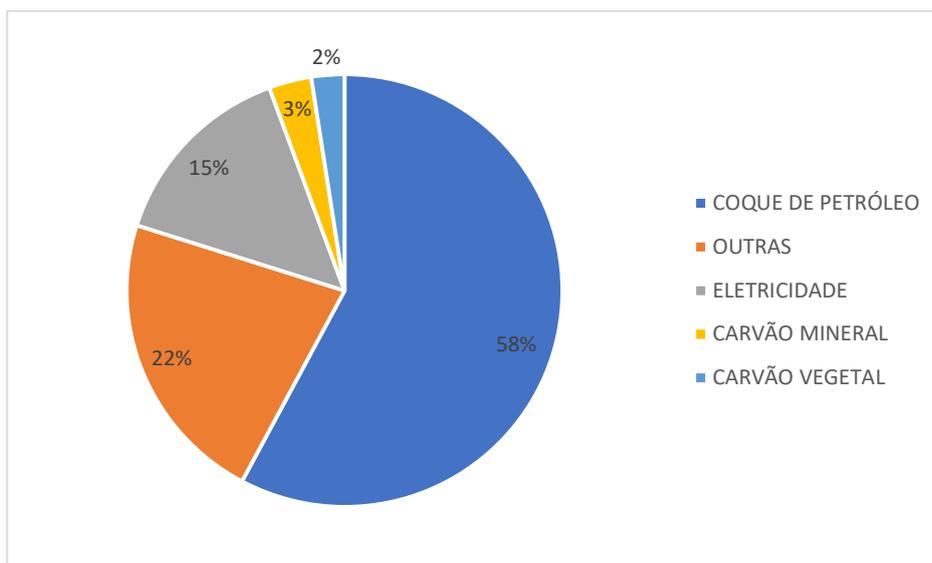


Figura 39 Matriz energética do setor de cimento brasileiro

Fonte: elaboração própria com base em EPE (2023b)

A partir de dados da *Global Cement and Concrete Association* (2022), é possível analisar o comportamento da intensidade de emissões (kgCO₂e/t cimento) entre 1990 e 2020. Assim como no mundo, a intensidade brasileira diminuiu ao longo dos anos, com uma redução relativa de 19% quando comparada com o primeiro ano da série histórica. Uma queda superior as registradas na média global (-17%) e no continente europeu (-15%).

Comparado com a indústria de cimento global, a produção nacional possui menores índices de emissão (Figura 40). Em um intervalo de quarenta anos, o Brasil se posicionou como um dos países com menor intensidade de emissões na indústria de cimento (SNIC, 2022). Atualmente, são emitidos 565 kg de CO₂ para cada tonelada de cimento produzido no Brasil, contra 633 kg CO₂ na média mundial, uma diferença de 12%.

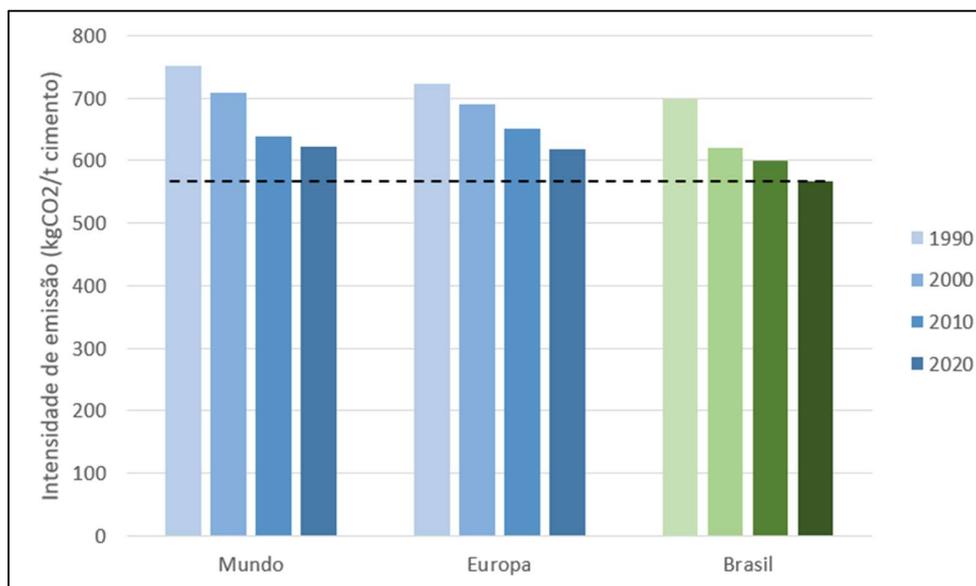


Figura 40 - Intensidade de emissões da indústria de cimento no mundo, Europa e Brasil entre 1990 e 2020

Fonte: elaboração própria com base em GCCA, (2021); SNIC, (2023)

A baixa intensidade de emissão de GEE da indústria de cimento brasileira está relacionada com o elevado uso de adições e matérias-primas alternativas na sua fabricação (Figura 41) Figura 40(SNIC, 2019). O uso de adições é necessário para garantir as propriedades específicas e diversas que cada tipo de cimento exige. Entretanto, o uso de adições também contribui significativamente para redução das emissões de GEE. O Brasil é um dos países com maior uso relativo de adições na indústria de cimento. Olhando a série histórica, tanto a média global quanto a média dos países europeus, houve uma baixa redução da proporção de adições na produção de cimento, com uma queda na faixa entre 3% e 6% em todo intervalo. Já o Brasil registrou uma redução de 16% entre 1990 e 2020, atingindo uma proporção de 71% na razão clínquer/cimento (SNIC, 2023)

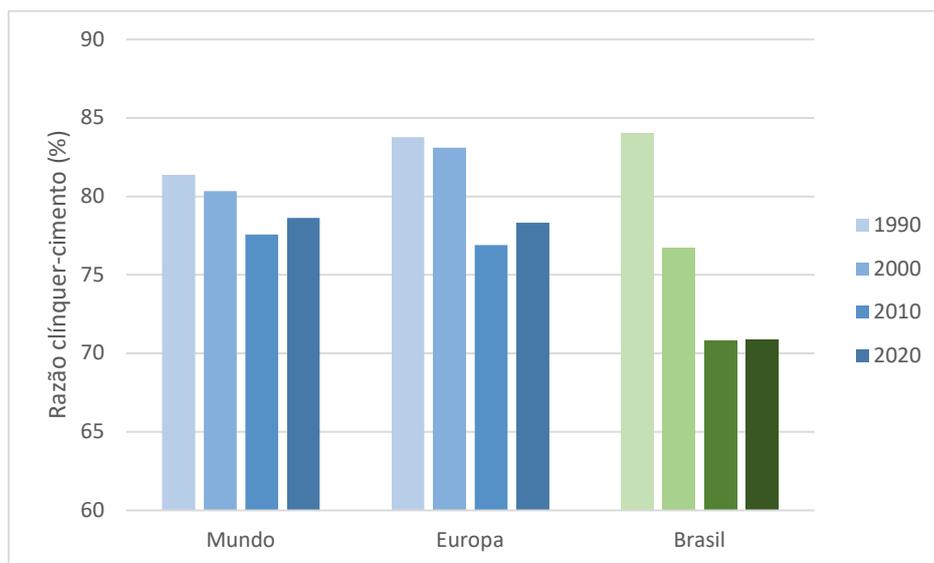


Figura 41 - Razão Clínquer cimento Mundo, Europa e Brasil entre 1990 e 2020

Fonte: elaboração própria com base em GCCA (2021); SNIC (2023)

O comportamento das emissões da indústria de cimento é análogo ao do nível de produção do setor (Figura 42). Há um aumento gradual do nível de emissões, de 23,6 Mt de CO₂ em 2005 até um pico em 2014, atingindo o valor de 42,5 Mt CO₂. A partir desse ano, as emissões decrescem chegando devido à queda da produção no setor, atingindo o nível mais baixo dos últimos dez anos em 2018. A partir desta data, com a recuperação econômica e a atividade do setor de construção, o aumento da produção de cimento puxa para cima as emissões do setor, que ainda permanecem inferior ao valor registrado em 2014, mas ainda 60% superior às emissões de 2005.

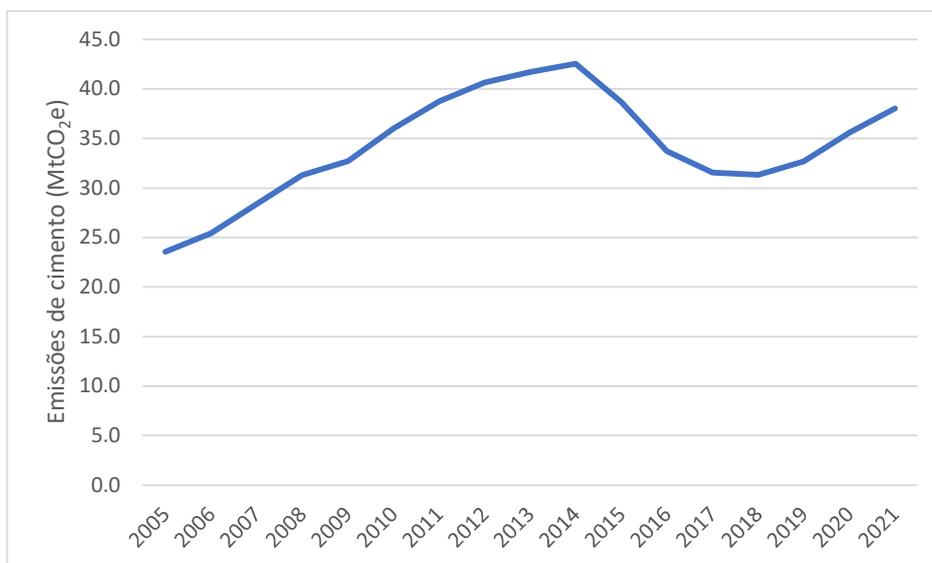


Figura 42 - Emissões de cimento (MtCO₂e)
 Fonte: elaboração própria com base em SEEG (2023)

A3. Ferroligas

Ligas de ferro formadas com outras substâncias diferentes do carbono são conhecidas como ferroligas. Existe uma gama de ferroligas, sendo as mais relevantes no contexto brasileiro (MME, 2019):

- (i) ferro-cromo, utilizadas na produção de aço inoxidável;
- (ii) ferrosilício, com diversas utilidades como na produção de aço com alto nível de permeabilidade para transformadores elétricos, produtos químicos e eletrônicos;
- (iii) ferro-manganês, utilizadas na produção de aço inoxidável;
- (iv) Outras ferroligas especiais utilizadas para conferir propriedades específicas ao aço.

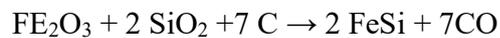
Para fabricação de ferroligas são necessárias quatro matérias primas principais: (i) o minério contendo os óxidos metálicos; (ii) o material fundente; (iii) os redutores; (iv) os eletrodos. Para cada tipo de ferroliga, há uma matéria prima mineral principal. Como exemplo, para produção de ferro-cromo é utilizado a cromita (FeO.Cr₂O₃), que contém óxido de cromo e óxido ferroso em sua composição.

Além da matéria prima mineral, é necessário adicionar um material fundente que garantirá a qualidade da ferroliga e operação satisfatória no forno, como por exemplo quartzo, bauxita, alumina, calcário, dolomita, entre outros.

Todo processo de redução exige um agente redutor para que a reação ocorra. No caso da indústria de ferroligas, os principais agentes redutores utilizados são o carvão mineral e o carvão vegetal.

Por fim, os eletrodos são materiais utilizados nos fornos elétricos a arco para geração do arco elétrico, podendo ser de grafite, amorfos de carbono ou Soderberg.

A fabricação de ferroligas ocorre a partir da fusão de minério, coque e escória em alta temperatura. Há uma grande variedade de processos, mas em geral, a redução carbotérmica em fornos elétricos de arco submerso pode ser destacada como a principal rota. A primeira etapa do processo de fabricação consiste no tratamento de matéria prima, onde elas são trituradas, peneiradas, misturadas e pesadas. Este material é adicionado ao forno a arco elétrico (EAF), onde uma corrente elétrica passa através dos eletrodos de grafite. A corrente fornece a energia necessária para a redução dos minerais, onde os óxidos de ferro e de silício dão origem ao ferrosilício. A temperatura desta reação pode chegar até 2.000°C.



O Anuário Estatístico da Metalurgia, elaborado pelo Ministério de Minas e Energia reúne as principais estatísticas de produção de ferroligas (MME, 2019). No período entre 2005 e 2020 não houve alteração no patamar de produção de ferroligas, mantendo-se próxima ao valor de um milhão de tonelada por ano, destacando-se uma drástica queda no ano de 2009 relativa a crise econômica global daquele ano Figura 43. Geograficamente, a maior parte dos produtores de ferroligas ficam localizados no estado de Minas gerais (ABRAFE, 2023).

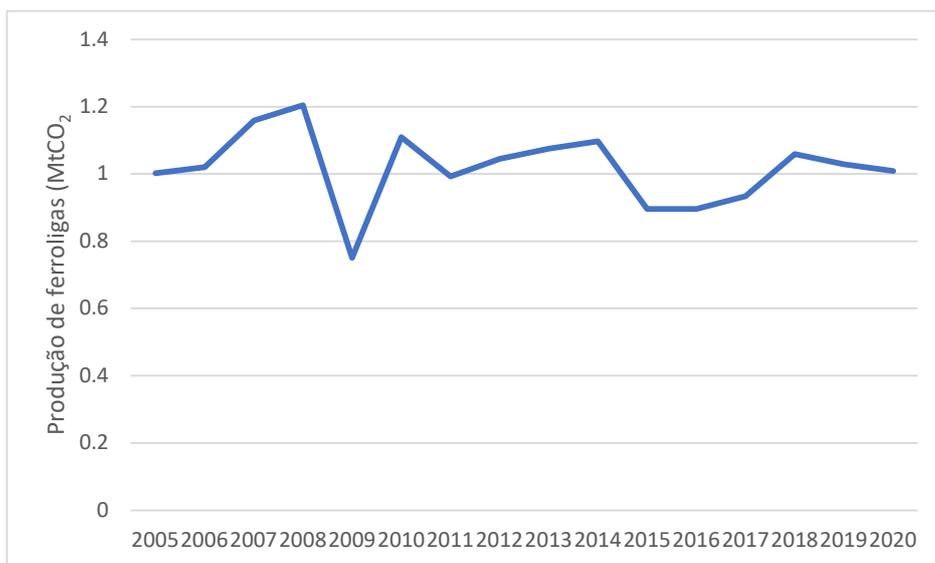


Figura 43 – nível de produção da indústria de ferroligas

Fonte: elaboração própria com base em MME (2019).

O setor de ferroligas é um dos menores segmentos industriais em termos de consumo energético, respondendo a cerca de 3% da demanda energética da indústria brasileira. Entre 2005 e 2022, a produção de ferroligas aumentou o consumo de energia, passando de pouco mais de 1.500 ktep para 2.265 ktep em 2022, com um período de estagnação entre 2005 e 2015 e um crescimento nos últimos sete anos (Figura 44) (EPE,2023).

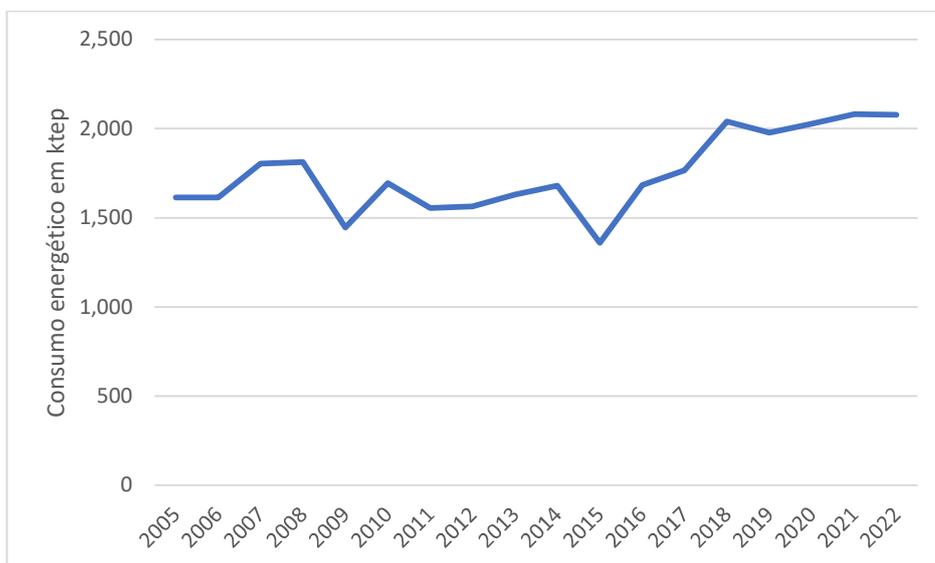


Figura 44 – Consumo energético da indústria de ferroligas

Fonte: elaboração própria com base em EPE (2023).

A Figura 45 apresenta a matriz energética do setor de ferroligas. Um indicador relevante para esta indústria é o elevado percentual de fontes não fósseis em sua matriz. Com um destaque para o carvão vegetal e lenha, principal fonte energética, com 47% da energia consumida em 2022, seguido de eletricidade com 42% (Figura 45). Desta forma, as fontes fósseis somam apenas 11%. Outro destaque é a redução da participação de fontes fósseis entre 2005 e 2022. No primeiro ano, esses energéticos totalizavam quase 20% do consumo total do setor, já em 2022 sua participação reduziu-se pela metade.

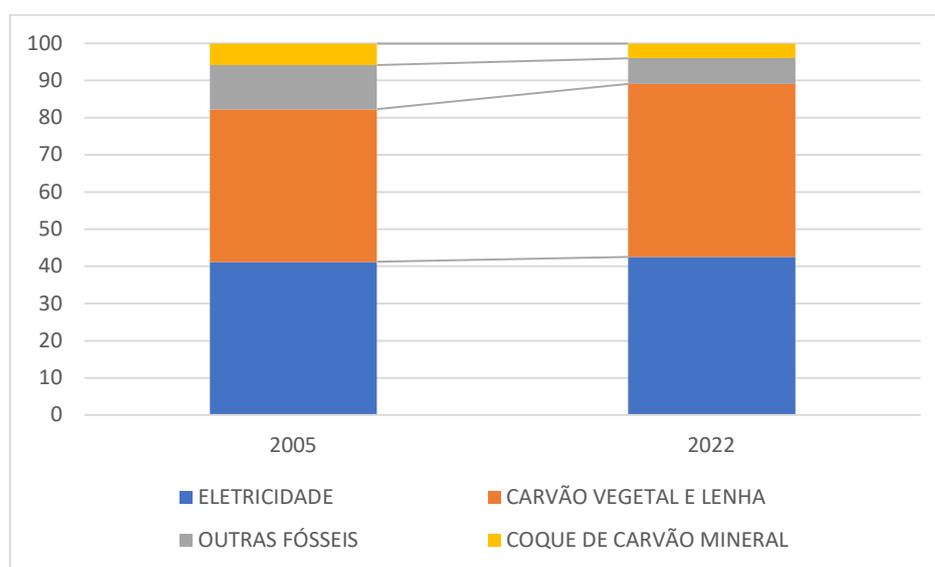


Figura 45 - Matriz energética da indústria de ferroligas
 Fonte: elaboração própria com base em EPE (2023).

As emissões de ferroligas apresentaram um declínio ao longo dos últimos 15 anos (Figura 46). Entre 2005 e 2014 houve um leve aumento das emissões, partindo de 1,3 Mt CO₂e para 1,4 Mt CO₂e. Entretanto, a partir de 2015 há uma queda de 27% das emissões até 2021. Um dos fatores que contribuíram com a redução das emissões neste setor foi o aumento de fontes renováveis na produção de ferroligas, como fora mencionado.

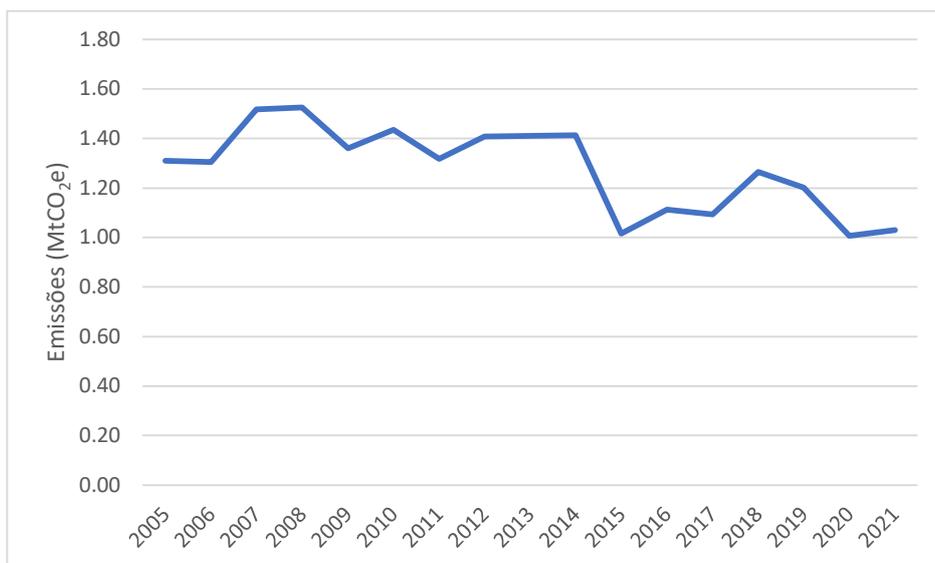


Figura 46 - Emissões da indústria de Ferroligas entre 2005 e 2021

Fonte: elaboração própria com base em SEEG (2023)

A4. Química

A indústria química brasileira é a sexta maior do mundo em termos de faturamento líquido com cerca de 187 bilhões de dólares em 2022 (Figura 47). No país, esta indústria possui uma participação de 3,1% no PIB do país (ABIQUIM, 2019) e é a terceira maior contribuição no PIB da indústria de transformação.

Uma análise do faturamento líquido histórico do setor mostra que a indústria química brasileira apresenta um ritmo de crescimento. Enquanto o faturamento em 1995 era de cerca de R\$ 20 bilhões, em 2022 este valor chegou ao total de R\$ 465 bilhões, um crescimento de 23 vezes.

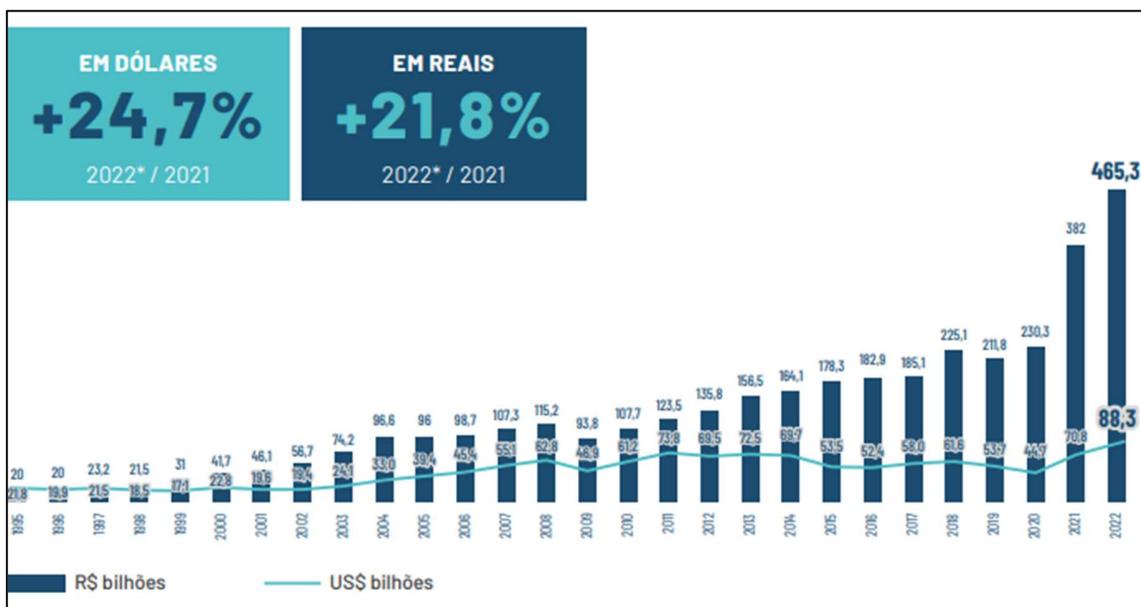


Figura 47 - Valor da produção da indústria química
Fonte: elaboração própria com base em ABIQUIM (2019)

Este setor caracteriza-se pela diversidade de processos e produtos. De acordo com a ABIQUIM, há quase mil fábricas de produtos químicos cadastrados no Guia da Indústria Química, e uma quantidade de produtos maior que três mil. A associação apenas faz o acompanhamento de 200 destes produtos visando maior precisão nas análises estatísticas do setor.

Os produtos da indústria química podem ser classificados em alguns grupos de acordo com as definições do IBGE e de critérios internacionais adotadas pela ONU: (i) produtos químicos inorgânicos; (ii) produtos químicos orgânicos; (iii) fabricação de resinas e elastômeros; (iv) fabricação de produtos e preparados químicos diversos.

Petroquímicos

Os produtos petroquímicos são uma categoria dentro do grupo de produtos orgânicos e abrangem tanto os petroquímicos básicos e os intermediários para resinas e fibras. Estas matérias-primas são largamente utilizadas pela indústria de polímeros.

Em linhas gerais, o processo produtivo da petroquímica parte do gás natural ou da nafta, onde serão transformados em insumos básicos de primeira geração (eteno, propeno,

buteno e aromáticos) (Figura 48). Por sua vez, esses produtos podem ser transformados em moléculas de cadeia mais complexa formando os chamados petroquímicos de segunda geração (intermediários) como os termoplásticos, PVC e polietileno. Por fim, há os produtos de terceira geração, formados pelas fibras sintéticas, plásticos e borrachas sintéticas.

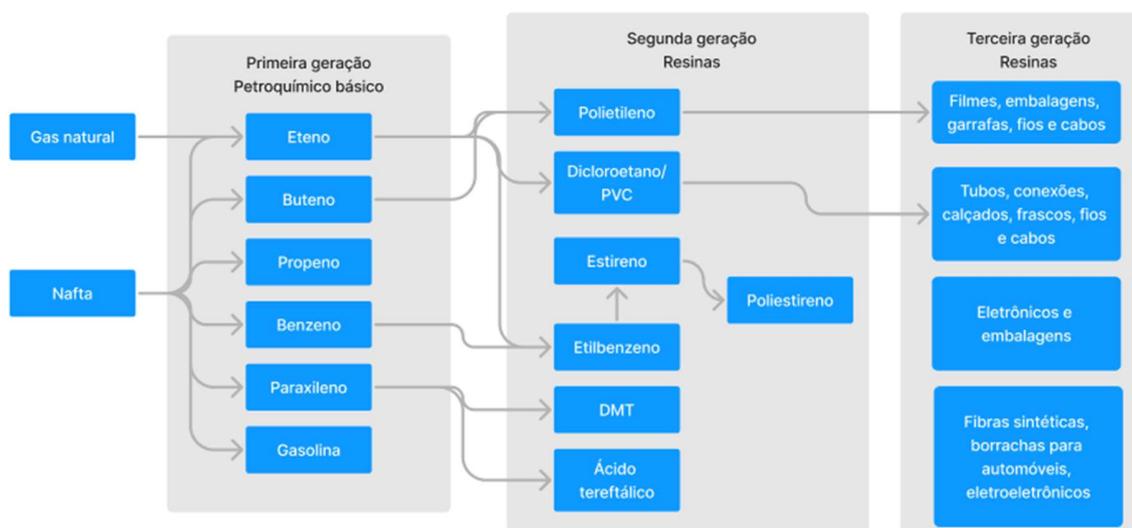


Figura 48 - Fluxograma da produção da petroquímica

Fonte: elaboração própria com base em MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE (2017b)

O eteno, um dos principais petroquímicos básicos, é obtido através da conversão do gás resultante do refino de petróleo ou do tratamento de gás natural. O processo de fabricação é feito em quatro etapas, começando pelo craqueamento térmico, onde o gás é processado em temperaturas entre 600°C e 800°C na presença de catalisadores. O produto desta etapa é levado até compressores, resfriadores e evaporadores seguido para as torres de fracionamento onde o etano é recuperado.

Fertilizantes

O Brasil, como uma das maiores potências agrícolas do mundo, é o quarto maior consumidor de fertilizantes, responsável por 8% do consumo global. Para suprir essa demanda, o país importa quase 80% de tudo aquilo que é consumido localmente (BRASIL, 2020).

Os produtos fertilizantes são compostos por um conjunto de insumos intermediários sendo o ácido sulfúrico, ureia, amônia e o ácido fosfórico, os principais produtos fabricados

no Brasil. Suas matérias-primas principais utilizadas na produção são os resíduos de petróleo, nafta, enxofre, piratas, rochas fosfáticas e rochas potássicas, das quais são produzidas as matérias-primas intermediárias com o ácido nítrico, sulfúrico e o fosfórico (Figura 49). A partir delas, são produzidos os fertilizantes simples, como a ureia, nitrato de amônio e sulfato de potássio, que por sua vez irá dar origem aos fertilizantes NPK (nitrogênio, fósforo e potássio)

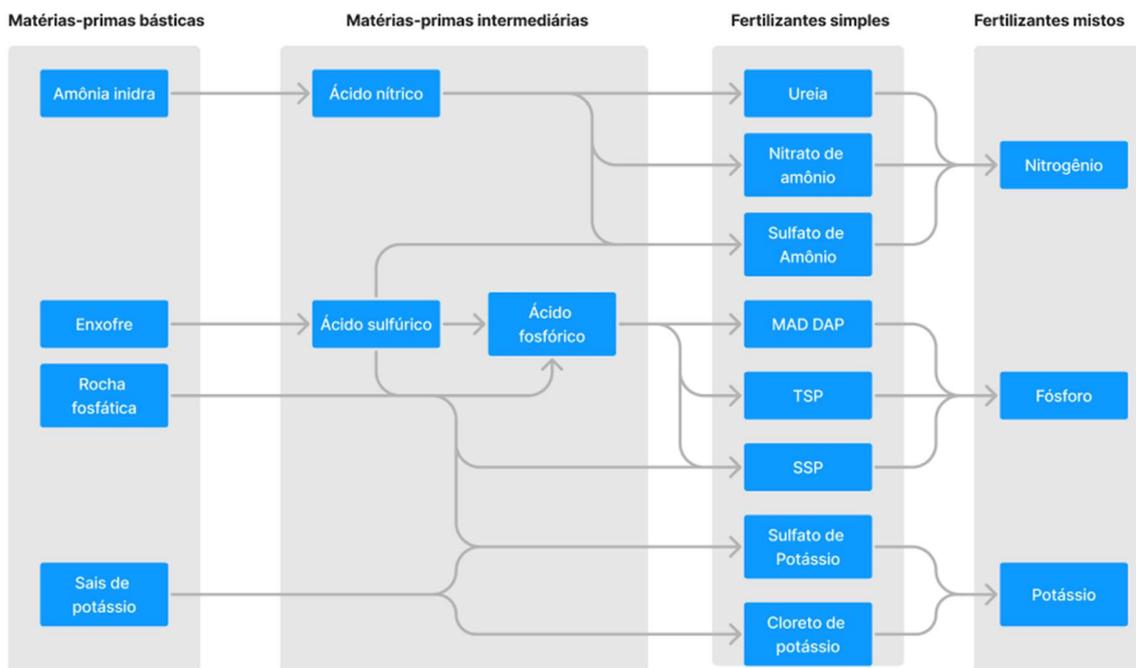
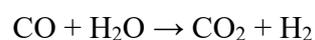
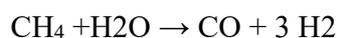
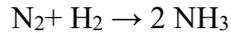


Figura 49 - Fluxograma da produção de fertilizantes
 Fonte: elaboração própria com base em BRASIL (2020)

A produção de amônia é feita através do processo Haber-Bosch, que utiliza o gás natural como sua principal matéria-prima. A primeira etapa da produção é a formação do gás de síntese, composto por monóxido de carbono e hidrogênio, através da reforma a vapor do gás natural. O monóxido de carbono gerado irá reagir com a água na reação de shift produzindo o dióxido de carbono e mais hidrogênio. Por fim, o nitrogênio reagirá com o hidrogênio gerando assim a amônia.





Cloro-álcalis

A indústria de cloro-álcali é composta pelos produtos químicos cloro, hidróxido de cloro, hidróxido de sódio (soda cáustica) e carbonato de sódio. Estas substâncias são utilizadas em diversas áreas industriais como na própria química, petroquímica, produção de papel e celulose e metalurgia.

No Brasil existem três principais rotas tecnológicas para produção dos produtos deste segmento: (i) células de mercúrio, (ii) células de membrana, (iii) células de diafragma, sendo esta última a principal tecnologia utilizada no Brasil respondendo por 63% da capacidade instalada. A obtenção de cloro-álcalis ocorre nos eletrodos através da passagem de corrente elétrica sobre a salmoura, fazendo a dissociação das moléculas de água misturadas com o sal, gerando o cloro, soda cáustica e hidrogênio (Figura 50).

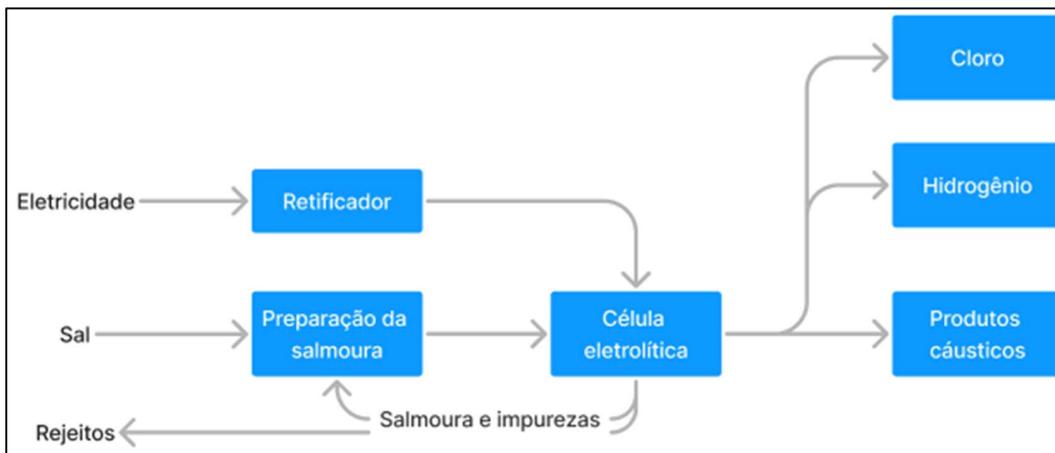


Figura 50 - Esquema da produção da indústria cloro-álcali

Fonte: elaboração própria com base em (MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE, 2017b)

Consumo energético e emissões

Dentre a variedade de produtos químicos, alguns segmentos específicos possuem alta intensidade energética e conseqüentemente de emissões: (i) petroquímico, (ii) fertilizantes, (iii) cloro-álcalis (HENRIQUES, 2010; MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE, 2017b; TOLMASQUIM; SZKLO; SOARES, 2003). Na Tabela 46 são apresentados alguns grupos de produtos químicos e seus respectivos consumos específicos de energia.

Tabela 46 - Consumo específico dos principais grupos químicos

Grupo	Consumo específico (tep/ t produto)
Cloro-álcalis	0,44
Intermediários para fertilizantes	0,012 - 0,368
Petroquímicos básicos	0,070 – 0,446
Intermediários para plásticos	0,078 - 0,943
Intermediários para plastificantes	0,078 – 0,478
Intermediários para resinas termofixas	0,053 – 0,733
Solventes industriais	0,071 – 0,287
Resinas termoplásticas	0,060 – 0,126
Elastômeros	0,214 – 1,010

Fonte: elaboração própria com base em BAJAY; BEISSMANN; GORLA, (2010); MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE, (2017b)

A indústria química é o quarto maior consumidor de energia dentre os segmentos que compõe a indústria de transformação, respondendo por 7% da demanda de energia do setor no ano de 2022 (EPE, 2021) .

O perfil energético desta indústria apresentou um comportamento similar aos demais em relação ao consumo de óleo combustível (Figura 51). Este energético, que era a principal fonte de energia na década de 70, teve sua parcela reduzida com o passar dos anos, com o aumento de outras fontes fósseis a partir dos anos 80 e o gás natural nos anos 2000. Hoje a matriz energética deste setor é formada, predominantemente, por gás natural (31%), eletricidade (32%) e outras fontes fósseis (33%).

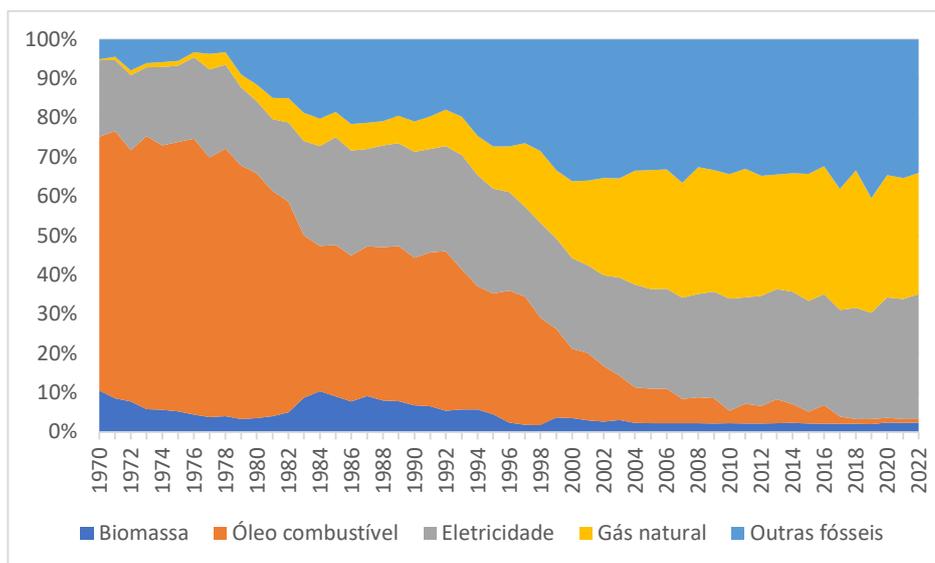


Figura 51 - Matriz energética do setor da indústria Química entre 1970 e 2022

Fonte: elaboração própria com base em EPE (2021)

O consumo energético total da indústria química tem apresentado um comportamento de queda nos últimos 17 anos (Figura 52). Saindo de, aproximadamente, 7.000 ktep em 2005, chegando a 6.382 ktep em 2022, o que representa uma taxa média de redução anual de 0,65%. Houve, no ano de 2021, uma queda mais acentuada do consumo de energia, o que pode estar relacionado com os impactos na produção causado pela pandemia global da COVID-19.

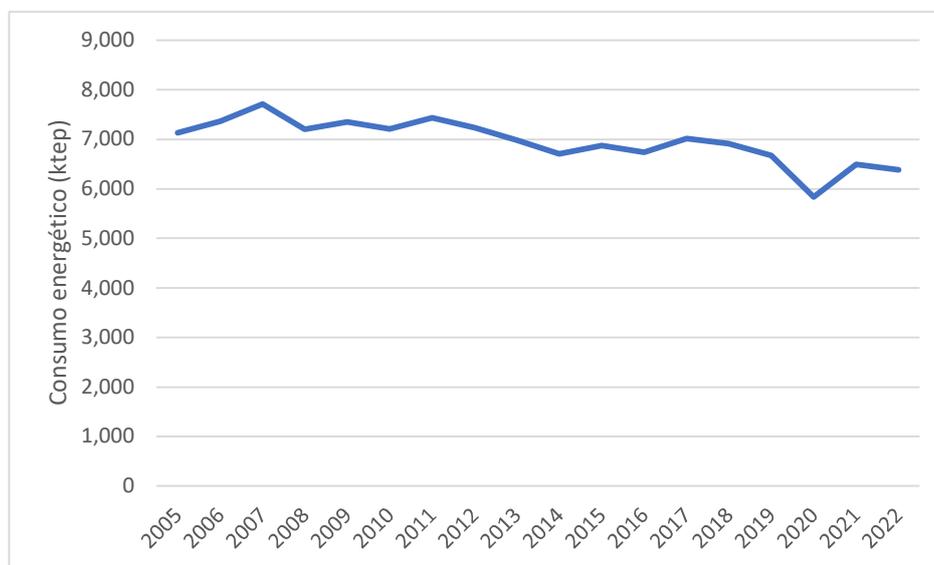


Figura 52 - Consumo energético na indústria química entre 2005 e 2022

Fonte: elaboração própria com base em EPE, (2021)

As emissões da indústria química ocorrem tanto pelo consumo de energia, responsável por 80% das emissões do setor, quanto pelas reações de seus diversos processos (Figura 53). Ao longo dos anos, houve uma redução das emissões, com um destaque para queda das emissões de processo entre 2006 e 2007. A razão desta queda está na implementação de um projeto de MDL na única planta de produção de ácido adípico, no qual foi instalado um sistema de controle que gerava a decomposição térmica do N₂O em N₂.

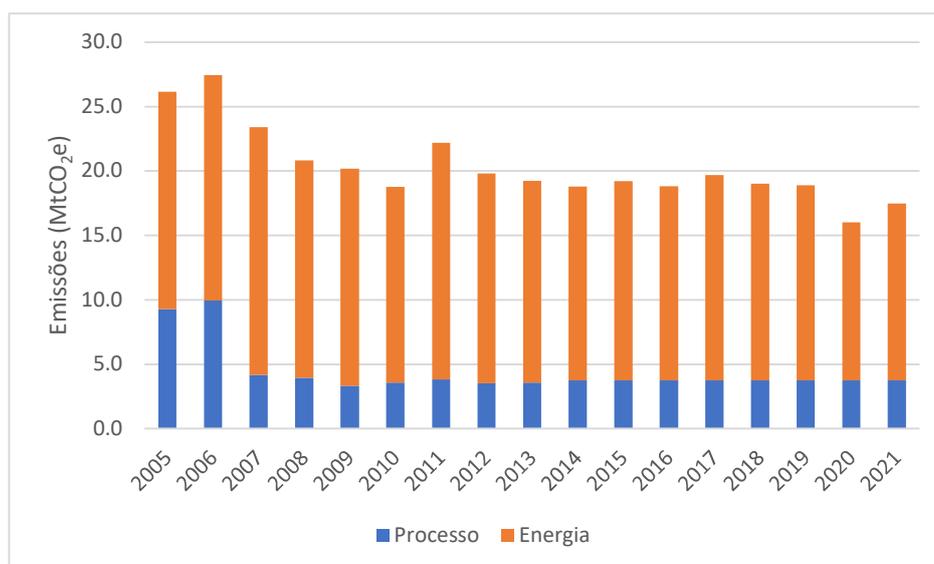


Figura 53 - Emissões de energia e processo da indústria química entre 2005 e 2022
 Fonte: elaboração própria com base em SEEG (2023)

A5. Mineração e pelletização

Mineração é a atividade que engloba o processo de “*pesquisa, exploração, lavra (extração) e beneficiamento de minérios presentes no solo*” (ANM, 2020). Já os minérios podem ser definidos como sendo metálicos, não-metálicos ou energéticos. Neste trabalho, o setor de mineração e pelletização irá abordar os dois primeiros, em harmonia ao setor industrial definido dentro do escopo do Balanço Energético Nacional e das comunicações de emissões de gases de efeito estufa.

De acordo com a Agência Nacional de Mineração, os minerais metálicos correspondem a quase 90% do valor da produção mineral brasileira, sendo que onze minerais metálicos respondem por 99,7% de seu valor de produção (R\$ 312 bilhões). (i) ferro, (ii) ouro, (iii) cobre, (iv) níquel, (iv) alumínio, entre outros (Figura 54). Já a pelletização

corresponde a fabricação de pelotas de minério de ferro, que são utilizadas pela indústria siderúrgica como matéria prima para fabricação de aço.

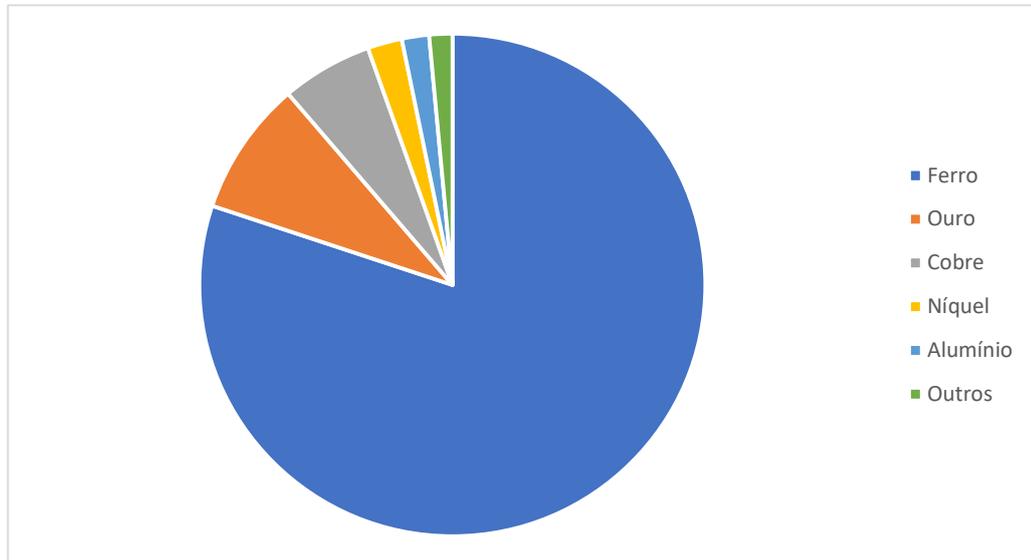


Figura 54 - Percentual da produção de minérios no Brasil

Fonte: Elaboração própria com base em ANM (2023)

O Brasil ocupa posição de destaque no setor de mineração mundial: o país possui a maior produção de nióbio do mundo, com cerca de 88% da produção global; o segundo maior produtor de minério de ferro corresponde a 18% da produção mundial; também é o segundo país que mais produz grafite com 10% da produção global; o quarto maior produtor global de bauxita, somando 13% do que é produzido no mundo (FONG-SAM, 2022)

Para entender o nível de atividade do setor, pode-se olhar para a produção anual de minério de ferro beneficiado. Ao longo dos anos houve um aumento gradual da produção, partindo de menos de 300 Mt de minério de ferro, atingindo um ápice por volta de 450 Mt em 2018 (Figura 55). A partir deste ano, houve uma queda nos dois anos seguintes, e um aumento no último ano registrado.

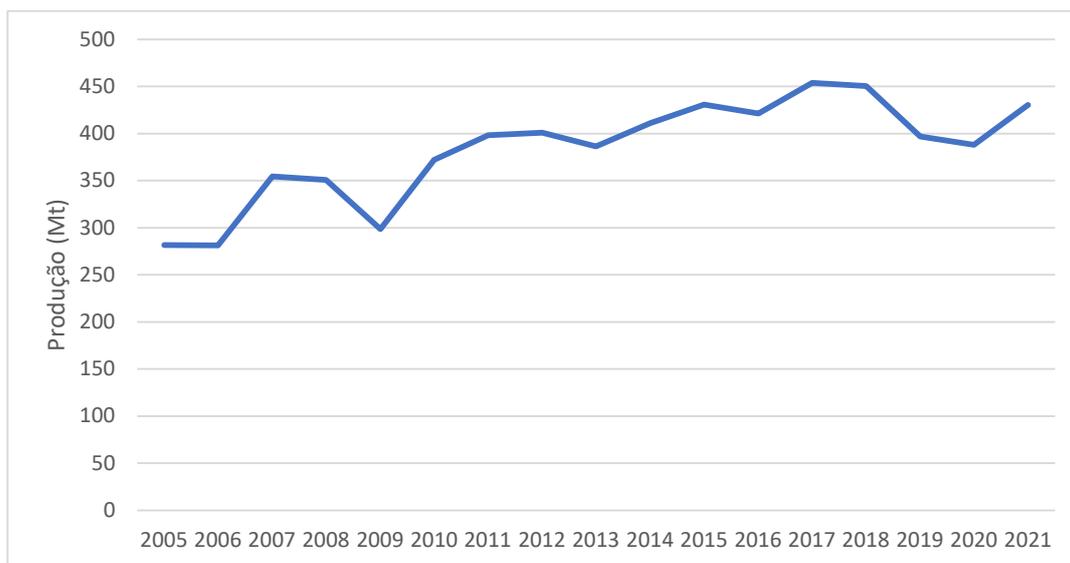


Figura 55 – Produção de ferro entre 2005 e 2021
 Fonte: elaboração própria com base em ANM (2023)

Outro fator de destaque é a alta concentração de reservas e altíssima qualidade. Isto representa uma vantagem competitiva de extrema relevância em cenários de descarbonização, uma vez que algumas rotas de produção de aço de baixo carbono necessitam do minério de ferro com alta concentração.

Processo produtivo

Em linhas gerais, a mineração brasileira pode ser considerada um processo homogêneo, onde suas etapas de produção não se diferenciam muito tendo em vista as características semelhantes dos produtos. A produção mineral pode ser desagregada em quatro etapas principais: (i) extração; (ii) transporte; (iii) beneficiamento; (iv) briquetagem/pelotização.

A extração mineral pode ser feita através de duas técnicas, a céu aberto ou subterrânea, sendo a primeira a técnica mais utilizada no Brasil, assim como no mundo. Esta técnica é predominante devido sua maior produtividade, menor custo unitário, maior recuperação do minério e maior segurança. A mineração em céu aberto pode ser feita através de dois grupos de métodos distintos: escavação mecânica (*open pit*, *cast mining* e *strip mining*) e método hidráulico (*placer* e mineração por dissolução) (MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE, 2017c; MILANEZ, 2017; ROCHA, 2017)

Em seguida, o material é transportado utilizando caminhões, método mais utilizado no mundo, ou correias. O transporte por caminhões é largamente utilizado devido sua flexibilidade operacional que permite a realocação dos equipamentos para outras etapas de operação. Entretanto, esta técnica possui baixa eficiência energética uma vez que os caminhões fazem, aproximadamente, metade do caminho vazios além da necessidade de construção de longas estradas para garantir a inclinação adequada para o deslocamento dos veículos (MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE, 2017c). O sistema de correias é utilizado para distâncias maiores conectando o ponto de carga e descarga. Este método garante um custo inferior ao dos caminhões, uma demanda constante por energia elétrica, menor custo de manutenção, e menor emissão de GEE.

A etapa de beneficiamento (ou tratamento) (Figura 56) é feita para melhorar as características do produto, aumentando seu valor. Nesse processo são ajustadas a granulometria e a concentração das espécies minerais contidas no produto. A concentração do minério é baseada nas diferenças entre o produto mineral de interesse e os minerais de ganga (mineral sem valor econômico), como massa específica, suscetibilidade magnética, propriedades químicas, elétricas, cor, radioatividade, forma, entre outros (CETEM, 2010).

O termo concentração pode ser definido como um processo para aumentar a proporção do minério de interesse na carga total. Para ser concentrado, primeiramente o minério precisa ter seu tamanho reduzido. Isto é feito através de uma etapa chamada de britagem/moagem, também chamada de cominuição, onde o tamanho do minério é reduzido a centímetros ou micrometros. Em seguida o minério é peneirado a fim de separar os tamanhos e classificado através de cicloneamento ou classificação em espira.

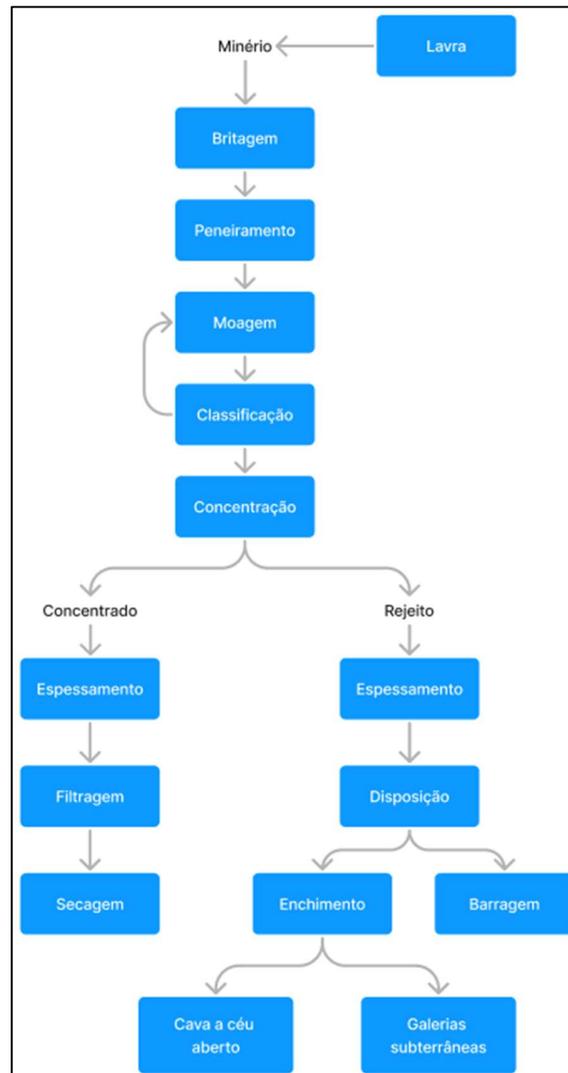


Figura 56 - Fluxograma simplificado de mineração

Fonte: elaboração própria com base em MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE (2017c)

Alguns minérios, como o caso do minério de ferro, ainda não estão na estrutura ideal para serem utilizados por outras indústrias. Ao fim dos três processos supracitados, o minério de ferro se encontra em uma granulometria ultrafina, estado não adequado para utilização nos fornos siderúrgicos.

É, então, feito um processo de aglomeração deste material fino para produção de *pellets* que poderão ser utilizados na fabricação de aço. Esta etapa é intensiva em energia, uma vez que a aglomeração é feita em fornos cuja temperatura de operação é por volta de 1.150°C.

Perfil energético e de emissões

A indústria de mineração e pelotização viu seu consumo energético subir gradualmente até 2014, com uma queda abrupta no ano de 2009 devido à crise econômica global que impactou o nível de produção do setor (Figura 57).

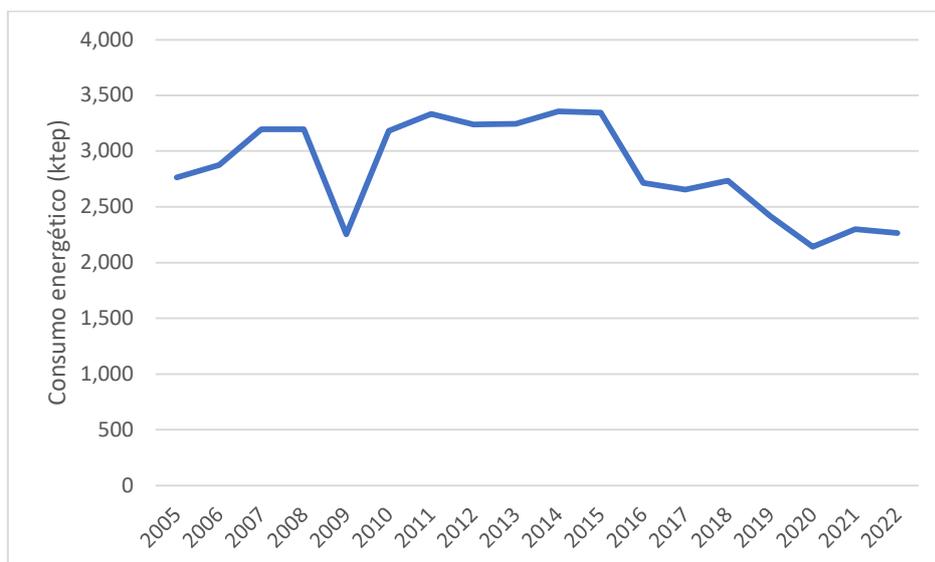


Figura 57 - Consumo energético da indústria de mineração e pelotização

Fonte: elaboração própria com base em EPE (2021)

Em relação ao perfil energético, o setor de mineração possui um consumo predominante de fontes fósseis, como o gás natural, óleo combustível e coque. Entretanto, houve uma mudança neste perfil entre 2005 e 2022 (Figura 58). Enquanto no primeiro, o consumo de óleo combustível correspondia a 20% da demanda do setor, em 2022 esta fonte reduziu sua participação para 6% com um aumento na mesma proporção do consumo de eletricidade, saindo de 30 para 44% no intervalo selecionado.

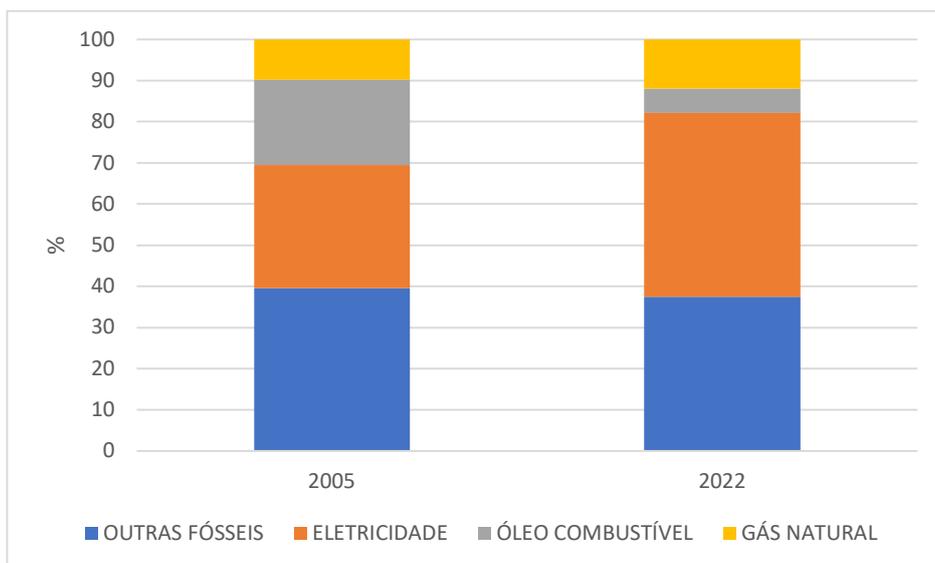


Figura 58 - Matriz energética da indústria de mineração e pelotização

Fonte: elaboração própria com base em EPE (2021)

As emissões do setor de mineração caíram 42% entre 2005 e 2022. Até 2015 houve uma tendência de aumento das emissões, seguindo o padrão do crescimento da produção do setor (Figura 59). A partir de 2016, há uma redução das emissões do setor, que reduziram em um nível maior que a queda do consumo de energia, uma redução de 32% no consumo de energia *versus* uma redução de 50% nas emissões. Esta diferença ocorre pelo aumento da participação de fontes renováveis no setor, como o consumo de eletricidade que cresceu neste período.

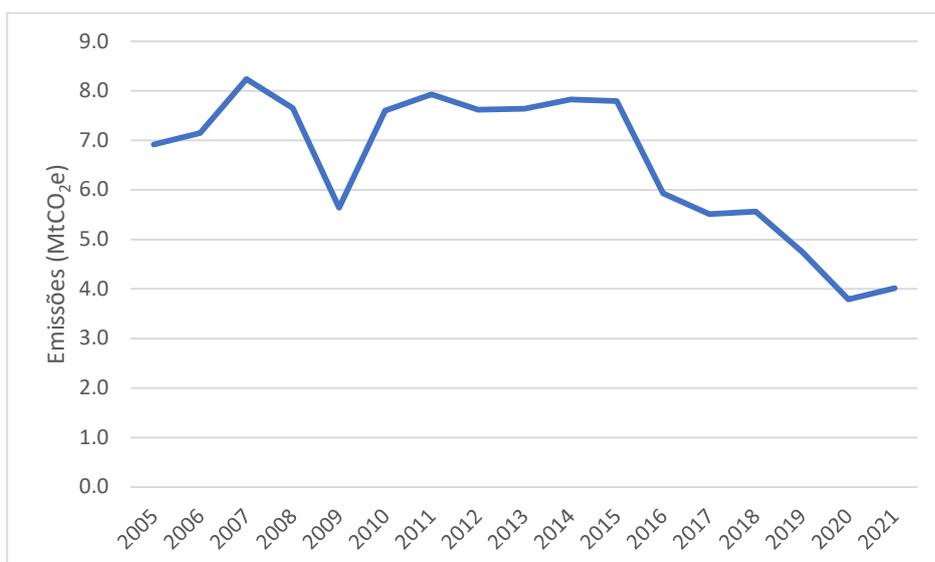


Figura 59 - Emissões do setor de mineração e pelotização brasileiro entre 2005 e 2022

Fonte: elaboração própria com base em SEEG (2023)

A6. Papel e celulose

O setor industrial de papel e celulose no Brasil é um dos maiores do mundo, sendo o oitavo maior produtor de papel, com 2,5% da produção global e o segundo maior de celulose, responsável por 11,3% (IBA, 2017). A vasta área territorial do país, que possui cerca de 9,9 milhões de hectares destinados a plantação árvores, área superior ao tamanho de Portugal, contribui para a elevada produção do setor. Outro elemento que contribui para colocação do país como um dos maiores produtores de papel e celulose do mundo é a elevada produtividade de sua matéria prima, com 39 m³/ha/ano para o eucalipto e 30 m³/ha/ano para o pinus, valores superiores à média global e três a quatro vezes maior do que a produtividade desses plantios em 1970 (10 m³/há/ano) (EPE, 2022; IBÁ, 2023).

Nos últimos 15 anos houve um aumento do nível de atividade do setor, puxado principalmente pelo aumento da produção de celulose, que praticamente dobrou entre 2005 e 2019, saindo de 10,4 Mt para 19,7 Mt (Figura 60). O grande crescimento da produção de celulose é influenciado pela demanda internacional por esse material. Cerca de 70% da quantidade de celulose produzida no país é exportada (EPE, 2022; IBÁ, 2023).

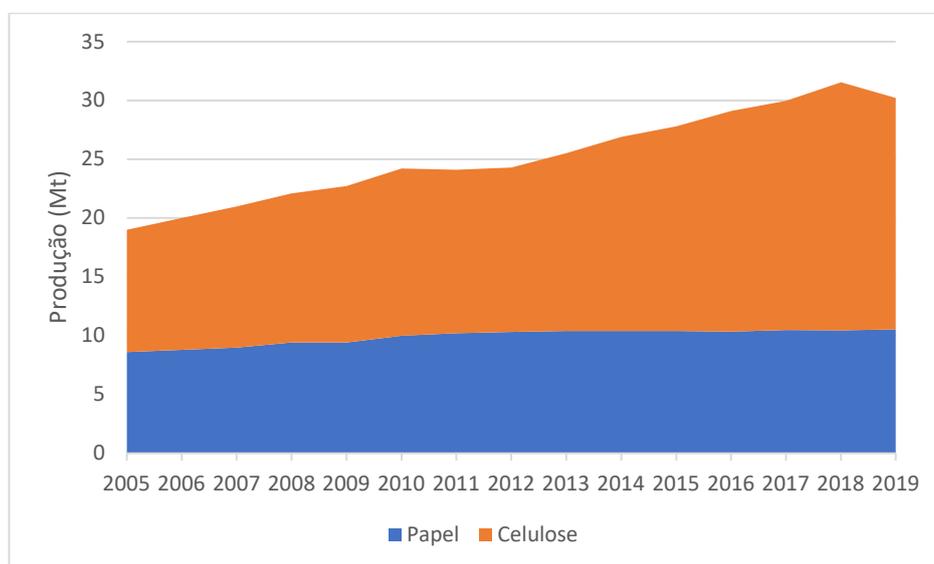


Figura 60 - Produção de papel e celulose entre 2005 e 2019 no Brasil

Fonte: elaboração própria com base em IBA (2017); IBÁ (2023)

Processo produtivo

No segmento industrial de papel e celulose, existem três processos principais que se distinguem de acordo com o produto: aqueles que produzem papel e celulose de forma integrada, os que produzem exclusivamente celulose e os que produzem exclusivamente papel (HENRIQUES 2010).

Em geral, a produção de celulose é feita por unidades de grande porte, cuja capacidade é de 1 a 2 milhões de toneladas por ano. Os processos de fabricação de celulose podem ser feitos através de uma rota mecânica ou química, sendo esta a mais utilizada no Brasil, dentre eles o processo Kraft. A produção passa por cinco etapas distintas: (i) preparo da matéria-prima (madeira), (ii) cozimento, (iii) lavagem, (iv) depuração; e por fim (v) branqueamento (HENRIQUES 2010). Além destas, acontece também a recuperação de produtos químicos, etapa fundamental do processo Kraft (Figura 61).

Inicialmente, a matéria-prima passa por um tratamento em que as cascas da madeira são removidas e os troncos são cortados em pedaços menores (cavacos). Em seguida, os digestores são carregados com os cavacos e é adicionado uma mistura formada por sulfito de sódio e soda cáustica chamada de licor branco de cozimento. Esta mistura causa a dissolução da lignina, formando as fibras individuais, o licor negro e os gases da digestão. Na etapa seguinte, a massa resultante da etapa de cozimento, formada pela polpa celulósica em mistura com o licor negro, é lavada a fim de separar essas duas substâncias. Isto é feito através da utilização de filtros rotativos operados em série com lavagem em contracorrente. A polpa é levada para a sala de peneiras onde ocorrerá a etapa de depuração no qual a polpa atravessa calhas de sedimentação para separar resquícios das cascas de madeira de etapas anteriores. Por fim, é feito o branqueamento da massa celulósica, feita para melhorar as propriedades (alvura, limpeza e pureza química) da celulose. Para isso, a massa é tratada em cinco estágios diferentes que utilizam óxidos em filtros lavadores. Em seguida, a celulose é depurada e enviada para secagem, onde será removida a água até o ponto onde haja 90% de fibra e 10% de água.

Como mencionado, no processo Kraft também é feita a recuperação de produtos químicos. A primeira etapa consiste na concentração do licor negro, feita através de evaporadores de múltiplo efeito. Posteriormente, este licor é queimado e seus gases são

preparação começa pela desagregação da celulose, onde a celulose em folhas ou tabletes é desagregada. No caso de plantas integradas, a celulose já vem em suspensão e é armazenada em tanques de suspensão. A refinação consiste em uma etapa onde as fibras de celulose serão cortadas, esmagadas e em seguida passarão por um processo de fibrilação, que irá aumentar a superfície da fibra em contato com a água. Após refinada, a celulose entra em um tanque de mistura com as outras matérias-primas e seguem para o processo de depuração, onde ocorrerá a limpeza da mistura de celulose para remoção de corpos estranhos e impurezas.

O resultado desse processo é encaminhado para a máquina de papel, que irá distribuir a suspensão de fibras através da caixa de entrada, seguindo para mesa plana, onde ocorrerá a formação da folha. Ao sair da mesa, a folha possui um elevado conteúdo de umidade (80-85%) que deverá ser removido. Isto é feito com a utilização de prensas que reduzem o teor de água para 50-65% e depois por cilindros secadores, que reduzirão a umidade para 3-8%

Perfil energético e de emissões

O setor de papel e celulose é reconhecido pela elevada participação de fontes renováveis em sua matriz (Figura 62). Ao longo de 50 anos, essa indústria aumentou a utilização de lixívia como fonte de energia em substituição do óleo combustível, que já foi responsável por 38% do consumo de energia do setor e hoje responde por apenas 2%. Isso foi possível graças a maior produção de celulose e investimentos no seu aproveitamento energético. Outro destaque é o uso de Gás Natural por esta indústria, que vem crescendo nos últimos 30 anos.

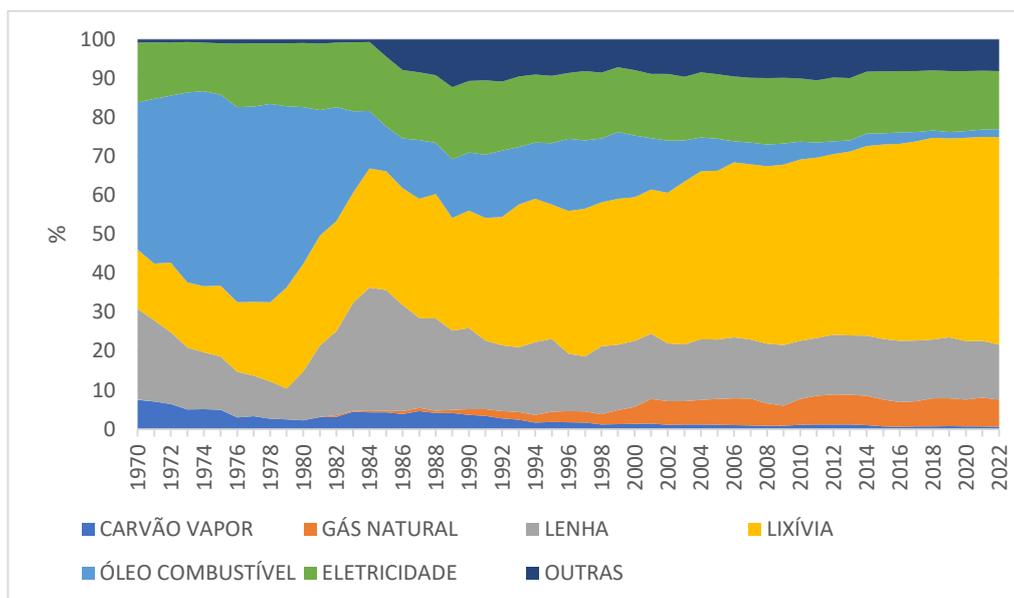


Figura 62 - Matriz energética do setor de papel e celulose entre 1970 e 2022

Fonte: elaboração própria com base em EPE (2023)

O consumo energético do setor de papel e celulose seguiu a tendência do nível de produção desta indústria (Figura 63). Houve um aumento gradual do consumo de energia no setor entre 2005 e 2020. Ao longo deste período o crescimento médio anual foi de 3,1%.

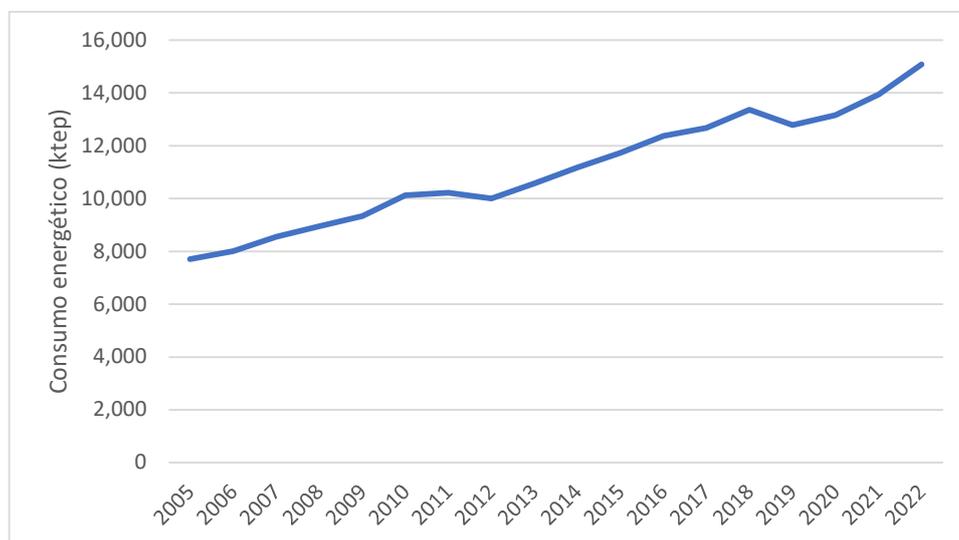


Figura 63 - Consumo energético entre 2005 e 2022 do setor de papel e celulose

Fonte: elaboração própria com base em (EPE, 2023)

As emissões da indústria de papel e celulose apresentaram um leve crescimento entre 2005 e 2021, neste período o setor registrou um aumento de 16% (Figura 64). Entretanto, ao

comparar o aumento do nível de produção do setor, cujo crescimento foi de quase 100%. Olhando como um indicador de emissão do setor, a quantidade de CO₂e emitida por tonelada produzida, houve uma queda de 32%, saindo de 0,25 para 0,17 tCO₂e/t de produto.

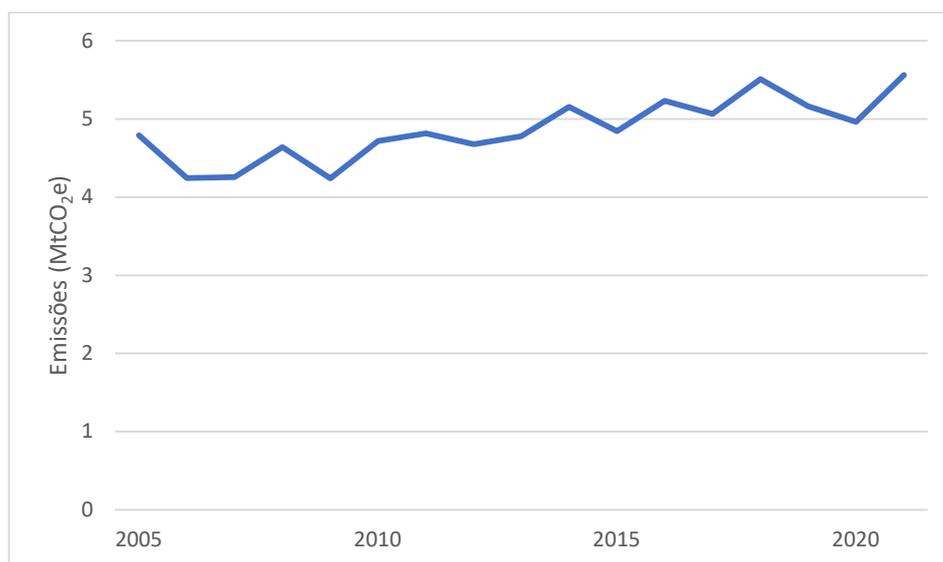


Figura 64 - Emissões do setor de papel e celulose entre 2005 e 2021

Fonte: elaboração própria com base em SEEG (2023).

A7. Têxtil

A indústria têxtil brasileira ocupa posição de relevância entre um dos principais países do mundo neste setor. O país é o quinto maior produtor têxtil e o quarto maior no segmento de vestuário, com uma produção anual média de 1,3 Mt e 6,71 Mt respectivamente (MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE, 2017d). De acordo com os dados do Sistema de Contas Nacionais, o valor da produção da indústria têxtil em 2020 foi de R\$ 159 bilhões (IBGE, 2022b).

O setor têxtil é altamente diversificado e pode ser segmentado de acordo com o produto fabricado (Tabela 47). Os principais segmentos são: fiação, que utiliza fibras têxteis para produção de fios crus ou beneficiados; tecelagem/malharia, que fabrica tecidos a partir de fios crus ou beneficiados; beneficiamento, que produz tecidos beneficiados ou acabados; e confecção, que utiliza tecidos beneficiados ou acabados para produzir peças de vestuário, para o lar ou técnicas (HENRIQUES 2010; PACHECO 2017).

Tabela 47 - Produtos da indústria têxtil, suas matérias primas e segmento

Matéria-prima	Segmento	Produto
Fibras têxteis	Fiação	Fios crus ou beneficiados
Fios crus ou beneficiados	Tecelagem/malharia	Tecidos
Tecidos	Beneficiamento/acabamento	Tecidos beneficiados/acabados
Tecidos beneficiados/acabados	Confecções	Peças vestuário/linha lar/técnicos

Fonte: elaboração própria com base em MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE (2017c)

Processo produtivo

A cadeia de produção da indústria têxtil é composta de quatro etapas, preparação da matéria prima, fiação, malharia/tecelagem, acabamento e confecção, simplificado na Figura 65.

Sua primeira etapa consiste na obtenção das fibras têxteis, que podem ter origem vegetal, animal ou mineral. A depender da sua origem, a fibra pode ser classificada em duas categorias: os naturais e as manufaturadas (sintéticas ou artificiais). No Brasil, cerca de 70% da matéria-prima utilizada é o algodão, 25% são as artificiais ou sintéticas e o restante lã, linho entre outras (MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE, 2017d).

A matéria-prima segue para a etapa de fiação, onde ela será limpa, aberta e processada para obter os fios, que consistem em agrupamentos de fibras ou filamentos formando uma linha contínua. Existe um conjunto variado de processos com diversas finalidades, como remover as impurezas, fixar o fio, paralelizar, estirar, entre outros (CETESB; SINDITEXTIL, 2009)..

Os fios seguem para o processo de tecelagem ou malharia que irá dar origem ao tecido plano ou a malha, distintos de acordo com a estrutura e a geometria de cada um. Este processo consiste no cruzamento dos fios em ângulos retos para formar o tecido ou a malha, através das etapas de urdimento, engomagem e tecimento (CETESB; SINDITEXTIL, 2009)..

Em seguida, estes produtos são conduzidos para a etapa de acabamento que irá melhorar as características do produto têxtil. Os processos desta etapa são formados pelo

beneficiamento primário, que irá eliminar as impurezas; beneficiamento secundário, onde ocorrerá o tingimento e a estamparia; e por fim, o beneficiamento terciário, onde o produto têxtil terá suas características melhoradas como a “estabilidade dimensional, toque/brilho, impermeabilização” (CETESB; SINDITEXTIL, 2009).

A última etapa do processo consiste na confecção das peças de vestuário, composta pelas etapas de recebimento de matéria-prima, separação e distribuição, corte, costura, acabamento finais e conferência/expedição (HENRIQUES 2010; PACHECO 2017).

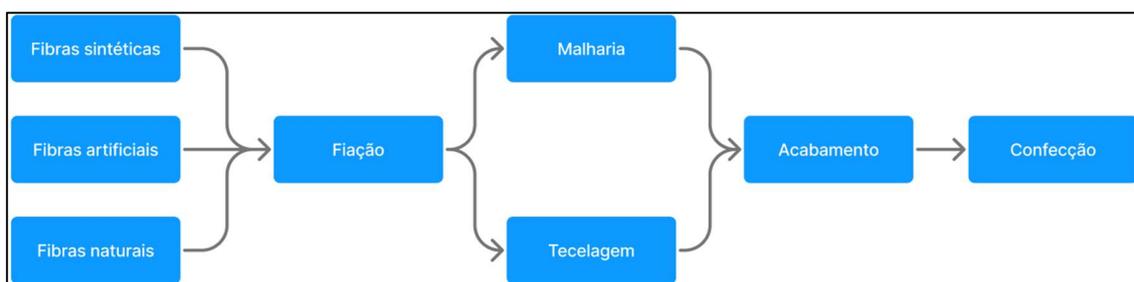


Figura 65 - Fluxograma do processo de produção da Indústria têxtil
Fonte: elaboração própria com base em HENRIQUES (2010)

Perfil energético e de emissões

A indústria têxtil tem como principal fonte de energia elétrica em seus diversos equipamentos e energia térmica, concentrada na etapa de beneficiamento (Figura 66). Há 50 anos atrás, o perfil energético desta indústria era composto majoritariamente de óleo combustível (45%), eletricidade (21%) e lenha (32%). Ao longo das décadas seguintes houve uma drástica redução do consumo de óleo combustível, cujos níveis atuais são inferiores a 1%, com uma expansão da eletricidade e do gás natural, principalmente a partir dos anos 90. Hoje, a eletricidade corresponde a 68% da energia consumida pelo setor, seguido do gás natural (21%).

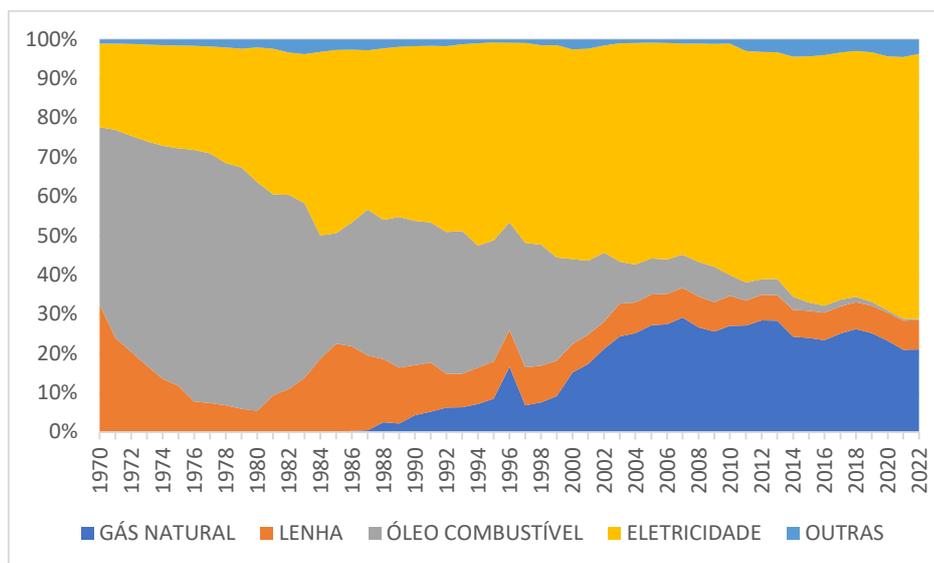


Figura 66 - Matriz energética da indústria têxtil
 Fonte: elaboração própria com base em EPE (2023)

O consumo energético da indústria têxtil vem diminuindo ao longo dos anos (Figura 67). A razão deste comportamento está ligada a queda na produção nos últimos anos, fruto da perda de competitividade da indústria nacional frente aos produtos importados. Entre 2005 e 2022, o consumo energético foi reduzido em um terço, saindo de 1.200 ktep para 800 ktep.

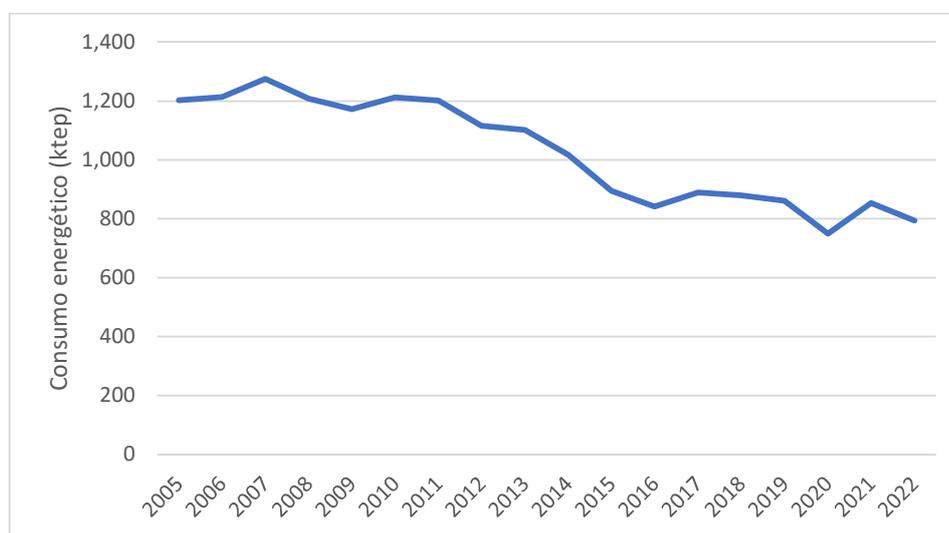


Figura 67 - Consumo energético da indústria têxtil entre 2005 e 2022
 Fonte: elaboração própria com base em EPE (2023)

Nesse mesmo sentido, as emissões da indústria têxtil também apresentaram um comportamento de redução (Figura 68). No mesmo intervalo, houve uma queda de 50%,

redução superior ao do consumo energético. Essa redução mais acentuada está ligada a substituição dos combustíveis fósseis por fontes renováveis, como a energia elétrica em detrimento do óleo combustível.

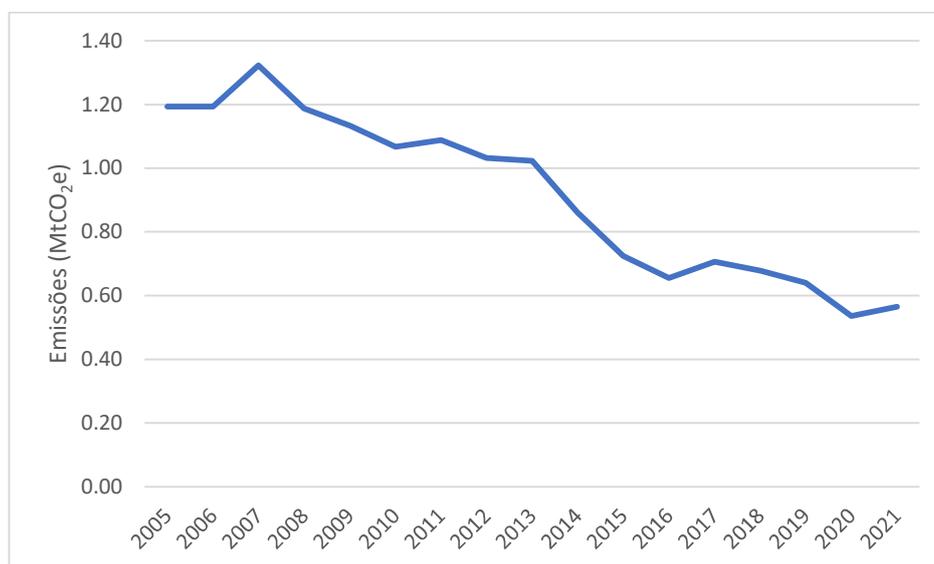


Figura 68 - Emissões totais da indústria têxtil

Fonte: elaboração própria com base em SEEG (2023).

A8. Alimentos e bebidas

A indústria de alimentos e bebidas desempenha um papel fundamental na economia brasileira, sendo um dos principais segmentos industriais. O valor da produção deste setor totalizou R\$ 986 bilhões (IBGE, 2022b), cerca de 7% do valor total da produção da economia brasileira no mesmo ano. De acordo com dados da Associação Brasileira da Indústria de Alimentos (2022), essa indústria é a maior empregadora do setor de transformação, correspondendo a 24% de todos os empregos (SEBRAE, 2023).

A indústria brasileira de alimentos e bebidas tem destaque internacional, sendo o segundo país com maior volume de exportação e o quinto em valor (Tabela 48). Suas exportações respondem por 16% das exportações brasileiras, totalizando R\$ 45 bilhões em 2021, com um saldo da balança comercial de R\$ 39 bilhões.

Tabela 48 - Ranking do Brasil e sua participação no mercado mundial dos principais produtos da indústria de Alimentos e Bebidas

Produto	Produção		Exportação	
	Ranking	Participação mundial (%)	Ranking	Participação mundial (%)
Café	1	33%	1	25%
Açúcar	1	22%	1	48%
Carne avícola	2	15%	1	38%
Carne bovina	2	16%	1	20%
Fumo	2	13%	1	27%
Suco de laranja	1	61%	1	75%
Soja	2	31%	1	43%
Milho	3	9%	2	22%
Algodão	5	6%	3	10%
Carne suína	4	3%	4	9%
Leite em pó	6	7%	10	
Arroz	8	2%		
Trigo	9	1%		

Fonte: elaboração própria com base em (BRADESCO, 2018) *apud*(EPE, 2018d)

Esse subsetor é caracterizado pela sua notável heterogeneidade, englobando a produção de 850 produtos diferentes (CNI, 2010). A Tabela 49 apresenta o valor da produção dos principais produtos desse setor no ano de 2021 (IBGE, 2022a).

Tabela 49 - Produção brasileira dos principais produtos da indústria de alimentos e bebidas

Produto	Valor (R\$)
Fabricação de óleos vegetais em bruto, exceto óleo de milho	113.732.773
Fabricação de alimentos para animais	83.213.009
Fabricação de açúcar em bruto	64.668.238
Fabricação de laticínios	62.980.712
Fabricação de malte, cervejas e chopes	47.786.445
Fabricação de refrigerantes e de outras bebidas não-alcoólicas	43.509.031
Fabricação de óleos vegetais refinados, exceto óleo de milho	32.428.426
Preparação do leite	27.416.821
Moagem de trigo e fabricação de derivados	26.227.072

Processo produtivo

Devido a grande quantidade de produtos dentro da indústria de alimentos e bebidas, não serão abordados os processos individualmente. Entretanto, para não deixar de ilustrar os processos deste setor, e não precarizar o entendimento de como ocorre o seu consumo de energia, pode-se analisá-lo através do consumo final de energia e as atividades responsáveis (Tabela 50).

Tabela 50 - Principais processos dos produtos da indústria de alimentos e bebidas

Cadeia produtiva	Principais processos
Derivados de Carne	Abate, desossa, separação de cortes e refrigeração
Café, chá e cereais	Torrefação, moagem, embalagem e armazenagem
Óleos e gorduras	Prensagem mecânica, filtragem, purificação
Derivados de leite	Refrigeração, filtração, clarificação, padronização, pasteurização ou esterilização, coagulação, fermentação, aquecimento
Derivados do trigo	Homogeneização, fermentação, cozimento, embalagem
Derivado de frutas	Descascamento, corte, cozimento, envasamento.
Chocolates, cacau e balas	Cozimento, homogeneização, resfriamento, moagem, torra, prensagem
Conservas de pescado	Limpeza e lavagem, pré-cozimento, esterilização, refrigeração
Bebidas	Brasagem, moagem, mosturação, clarificação, fermentação, pasteurização

Fonte: elaboração própria com base em MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE (2017d)

Consumo energético e emissões

Dentre os principais processos dos inúmeros produtos alimentícios, aqueles que mais consomem energia são a secagem, separação (evaporação e destilação), cozimento e esterilização (EPE, 2018d; MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE, 2017e). Este segmento consome energia térmica voltada para os processos de esterilização, cozimento, evaporação,

entre outros. Já a demanda de energia elétrica é voltada para atender as etapas de refrigeração, moagem, trituração, mistura e separação.

O perfil energético do setor de alimentos e bebidas apresentou uma redução do consumo de fontes fósseis nos últimos 50 anos (Figura 69). Em 1970, cerca de 12% da matriz energética deste segmento era de óleo combustível e outras fontes fósseis, caindo para cerca de 7% em 2022, sendo que o consumo de óleo combustível foi praticamente todo substituído por gás natural. Entretanto, em todo o período histórico, o setor possui uma elevada participação de fontes renováveis, com 88% em 1970 chegando a 93% em 2022. Uma diferença entre esses anos é a redução do consumo de lenha e uma maior utilização de eletricidade.

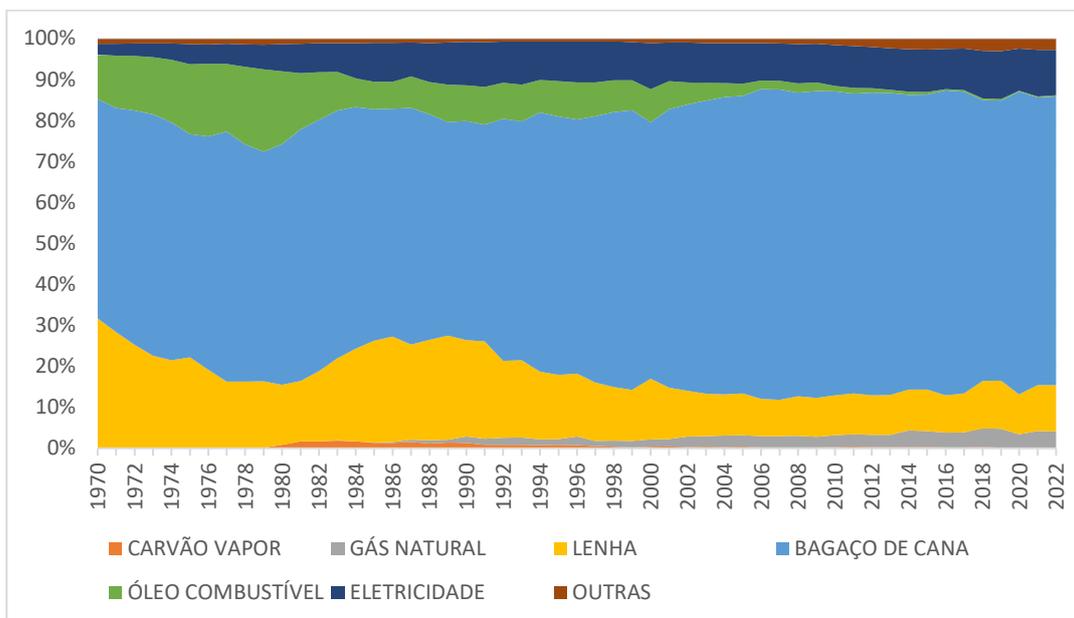


Figura 69 - Matriz energética da indústria de alimentos e bebidas

Fonte: elaboração própria com base em EPE (2023)

A produção de alimentos e bebidas possui o maior consumo energético dentre aqueles do setor industrial, respondendo por cerca de um quarto do total. O consumo energético total do setor apresentou um aumento entre 2005 e 2022, puxado principalmente por crescimento do setor. Em 2005, o consumo de energia era de 17.600 ktep, subindo para 22.500 ktep em 2022, representando um crescimento de 28% (Figura 70).

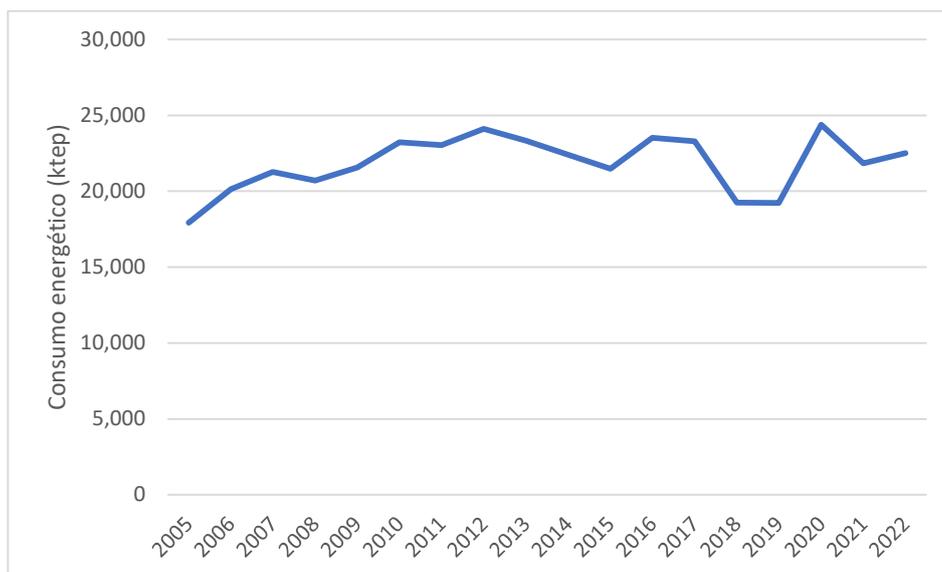


Figura 70 - Consumo energético da indústria de alimentos e bebidas
 Fonte: elaboração própria com base em EPE (2023b)

As emissões do setor de alimentos e bebidas teve pouca alteração entre 2005 e 2021, sendo registrado um aumento de 10% neste período, mas em relação aos últimos 10 anos, é possível notar uma leve queda, saindo de 6,3 Mt CO₂e em 2010 para 5,8 em 2021. O que contribuiu para este comportamento, mesmo com um acréscimo no consumo de energia foi o aumento da participação de fontes renováveis em detrimento das fósseis, em especial o óleo combustível.

Outro ponto de destaque para o setor de alimentos e bebidas é a sua baixa contribuição nas emissões totais do setor industrial. Apesar de ser o maior responsável pela demanda de energia da indústria, este segmento possui uma das menores parcelas de emissões fruto da sua alta parcela de renovabilidade na matriz energética (Figura 71).

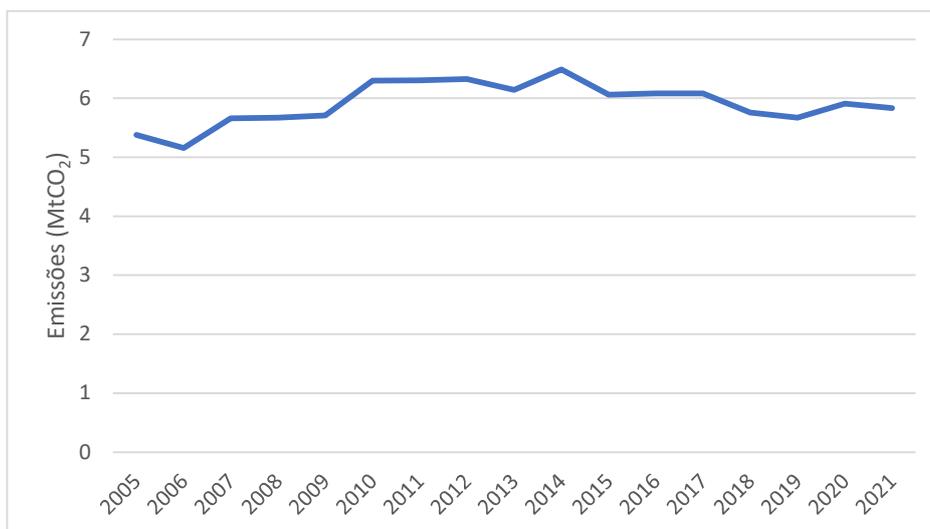


Figura 71 - Emissões de GEE do setor de Alimentos e Bebidas
 Fonte: elaboração própria com base em SEEG (2023)

A9. Metais não ferrosos

O setor industriais dos metais não-ferrosos é composto por todos os produtos da metalurgia, exceto as ligas de ferro e aço. Os principais produtos metalúrgicos deste segmento industrial são o alumínio, chumbo, cobre, silício metálico, níquel, estanho e zinco (MME, 2019). De todos estes produtos o alumínio é o principal metal não-ferroso fabricado no Brasil, com cerca de 63% da produção em 2020.

Ao longo dos últimos anos a indústria de alumínio tem apresentado queda na sua produção anualmente, apresentando uma redução de 44% quando comparado com 2013 (Figura 75). O Brasil que já foi o sexto maior produtor de alumínio no mundo, hoje é o décimo quarto. Diversas unidades suspenderam suas atividades nos últimos 10 anos, como a ALCOA, Companhia Brasileira de Alumínio, Albras, entre outras (SALUM; COLETA, 2020).

Um dos principais fatores que tem contribuídos para a perda de produtividade da indústria de alumínio brasileira é o alto custo da energia elétrica, o que impacta diretamente na competitividade do metal frente ao mercado internacional. Os custos de energia elétrica representam em média 25% do custo total da produção para os principais países produtores. No Brasil, de acordo com a ABAL (ABAL, 2017; ABAL; CNI, 2017), este custo pode chegar

a 40% do total da produção. Além disso, uma elevada parcela da produção brasileira utiliza tecnologias antigas, que possuem intensidade energética elevada (MASSARENTE et al., 2021).

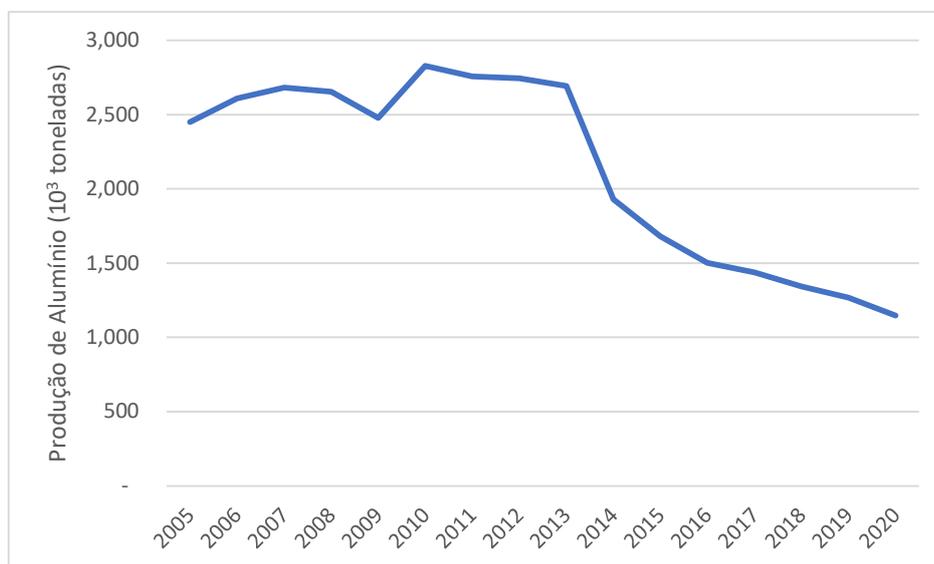


Figura 72 - Produção de alumínio no Brasil entre 2005 e 2020

Fonte: elaboração própria com base em MME (2019)

Processo produtivo

Em linhas gerais, os processos produtivos dos metais não-ferrosos apresentam similaridades nas suas principais etapas: (i) mineração, (ii) tratamento/concentração do minério, (iii) redução e fusão em fornos elétricos, e (iv) lingotamento.

Para ilustrar, destaca-se o processo de fabricação do alumínio, principal produto da indústria de metais não-ferrosos.

Sua fabricação começa a partir da bauxita, matéria-prima rochosa de cor avermelhada formada pelo óxido de alumínio, sílica, entre outros. O Brasil possui reservas de altíssima qualidade, com teor de óxido de alumínio próximo a 50%, e em grande quantidade, com a quarta maior reserva do mundo (MASSARENTE et al., 2021). A bauxita segue para o processo de beneficiamento, onde passará pela britagem, que buscará reduzir o volume da matéria-prima, e lavado para remoção de impurezas. Em seguida, o minério passa por ciclones e peneiras para remover a lama e seguem para as unidades produtoras de alumina.

O principal processo de fabricação de alumina no Brasil e no mundo ocorre através do processo Bayer. Após as etapas supracitadas, a bauxita é dissolvida em soda cáustica, filtrada e concentrada, formando a cristalização da alumina. Estes cristais são secados e calcinados para eliminar a água, onde o pó branco de alumina pura é enviado para a etapa de redução, no qual será obtido o alumínio primário (ABAL; CNI, 2017; COUTO, 2017; MCTIC, 2020).

Neste último processo, chamado de Hall-Héroult, a alumina calcinada é depositada em cubas eletrolíticas, onde a alumina será dissolvida em um banho de criolita fundida e fluoreto de alumínio, liberando oxigênio. Por sua vez, este gás irá reagir com o carbono contido nos anodos formando dióxido de carbono. O alumínio metálico precipitará no fundo da cuba, sendo transferido para a etapa de fusão e lingotamento.



Além do CO₂, a produção de alumínio também é responsável pelas emissões de perfluorcarbonos (PFC), gases de efeito estufa com elevado impacto de aquecimento global, com uma tonelada de PFC emitido equivalente até 10 mil toneladas de CO₂. Esses gases são emitidos durante o processo de redução eletrolítica, através do efeito anódico. Este efeito se manifesta na falta de alumina suficiente dissolvida no banho eletrolítico, que por sua vez resulta em maior resistência elétrica, aumentando a voltagem acima dos níveis normais da operação, emitindo tetrafluoreto de metano (CF₄) ou perfluormetano (C₂F₆).

Consumo energético e de emissões

Em relação ao perfil energético do setor de metais não-ferrosos, a principal mudança na estrutura foi a entrada de gás natural, a partir dos anos 1990, praticamente nulo até essa data, hoje o gás representa 10% do consumo de energia (Figura 73). Apesar da redução do consumo de óleo combustível, diferente dos demais segmentos industriais ainda há uma parcela elevada do consumo desta fonte no setor. Entre 1970 e 2022, o consumo de óleo combustível caiu de 20% para 16%. Outra fonte que apresentou redução neste intervalo foi a eletricidade, na década de 70, o consumo de eletricidade era próximo a 64%, hoje responde por apenas 45% do total.

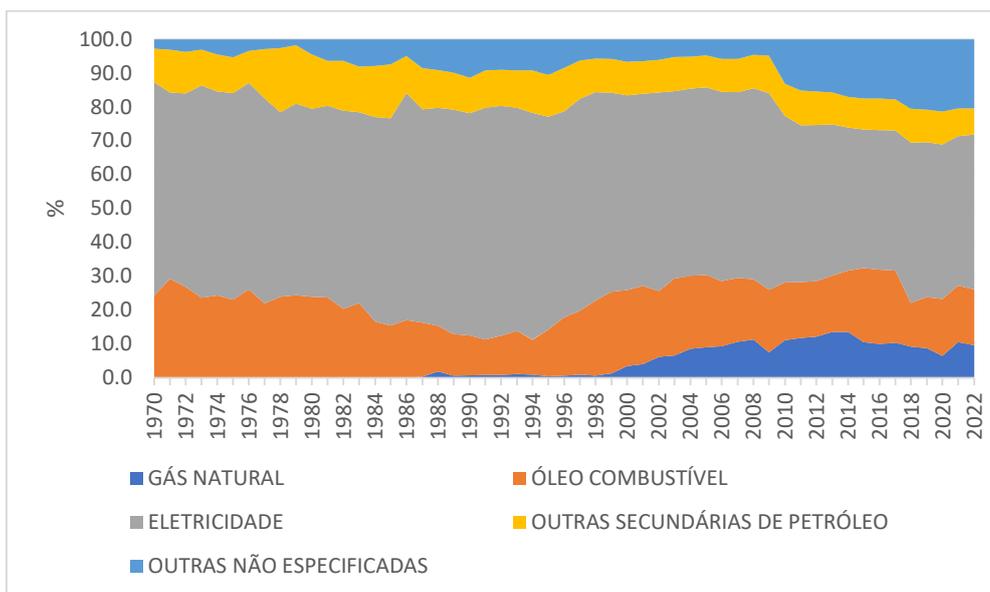


Figura 73 - Matriz energética do setor de metais não ferrosos entre 1970 e 2022

Fonte: elaboração própria com base em EPE (2023b)

O consumo energético total do setor registrou um aumento entre 2005 e 2012, seguindo a tendência de crescimento do aumento de produção. Analogamente, com a queda da produção a partir de 2013 a demanda de energia na demanda de energia pela indústria de metais não-ferrosos também se reduz, chegando em 2022 a um nível 17% inferior ao maior valor registrado na série histórica, em 2011 (Figura 74).

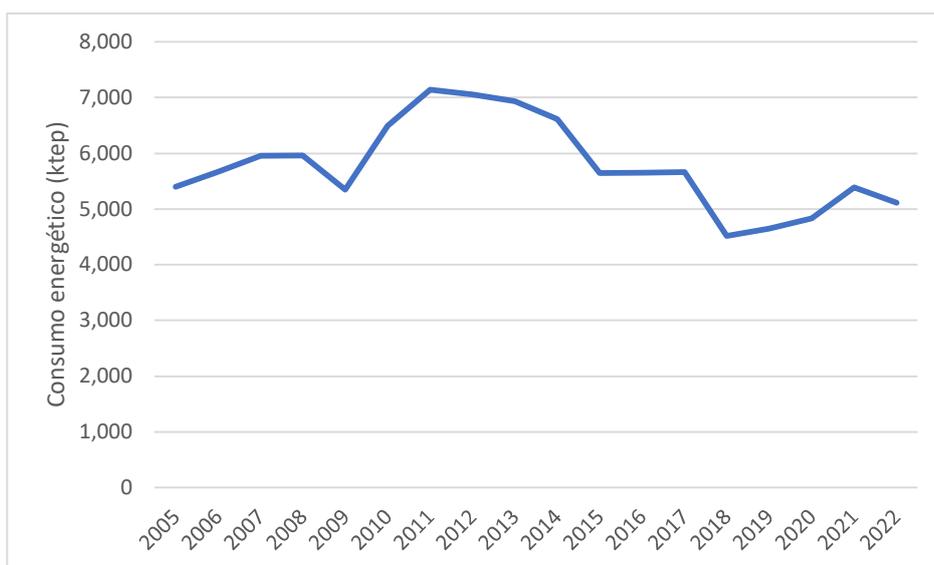


Figura 74 - Consumo energético do setor de metais não-ferrosos

Fonte: elaboração própria com base em EPE (2023b)

Ao analisar o consumo específico da indústria de alumínio do Brasil frente a outros países e regiões do mundo, a indústria nacional possui média levemente superior. Na média mundial, cerca de 14.000 kWh são necessários para produção de uma tonelada de alumínio primário no mundo *versus* 15.500 kWh no Brasil (Figura 75).

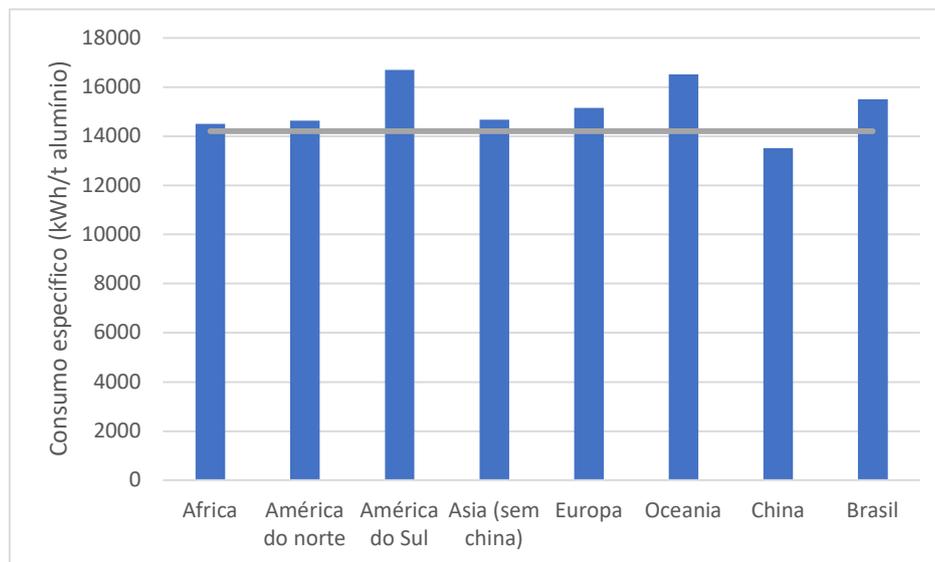


Figura 75 - Consumo específico da produção de alumínio em kWh/t de alumínio em diversas regiões do mundo e no Brasil

Fonte: Elaboração própria com base em EPE (2017); INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE (2023)

No que diz respeito às emissões da indústria de metais não-ferrosos, houve um crescimento entre 2005 e 2014, resultado de uma maior quantidade de emissões de combustível redutor nos outros metais não-ferrosos, exceto alumínio (Figura 76). As emissões totais do setor tiveram uma queda a partir de 2014, causadas pela redução da produção de alumínio, o que resultou em menores emissões tanto de energia quanto de processo.

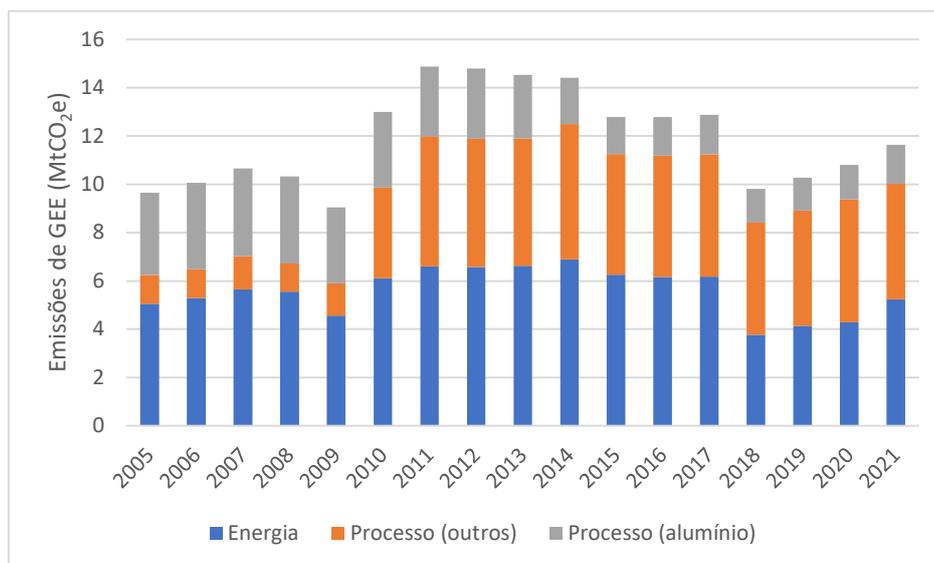


Figura 76 - Emissões de GEE da indústria de metais não-ferrosos entre 2005 e 2022
 Fonte: elaboração própria com base em SEEG (2023)

A10. Cerâmica

A indústria de cerâmica é um setor bastante diverso e de grande importância para a economia brasileira, com participação de 1% no PIB nacional formado por milhares de plantas industriais espalhadas por todo país (EPE, 2018f; MCTIC; ONU MEIO AMBIENTE, 2017f). O setor pode ser dividido em função de dois grupos de materiais comercializados, a cerâmica vermelha (ou cerâmica estrutural) que utiliza argilas de cor avermelhada como matéria prima, e a cerâmica branca, caracterizada por materiais de corpo branco. O primeiro grupo de materiais é formado por produtos de menor valor agregado como tijolos, telhas e blocos utilizados em larga escala pela indústria de construção civil (Tabela 51). Já a cerâmica branca é composta de produtos que empregam mais tecnologia, como pisos, azulejos, louças, refratárias e outros (HENRIQUES, 2010).

Tabela 51 - Tipos de cerâmica e sua quantidade produzida em 2021

Tipo de cerâmica	Unidade	Quantidade
Cerâmica vermelha		
Telhas de cerâmica	milhões de unidades	2.262
Tijolos	milhões de unidades	5.896
Outros de cerâmica vermelho	mil toneladas	473

Cerâmica branca		
Ladrilhos e pastilhas	milhão de m ²	1.023
Pias, banheiras, bidês e outros de uso sanitário	milhões de unidades	35
Outras de cerâmica branca	mil toneladas	6.763

Fonte: elaboração própria com base em IBGE (2022b)

Processo produtivo

Apesar dos diversos produtos nos dois segmentos cerâmicos, os processos de fabricação são similares. Ambos consistem, em linhas gerais, da extração de argila das jazidas, seguida do tratamento e mistura das matérias primas, formando uma massa, passando por etapas de moldagem, secagem, queima e acabamento do produto. A principal diferença está na complexidade do processo da produção de cerâmica branca, que envolve mais etapas e tecnologias.

O processo de fabricação de cerâmica vermelha começa na extração de argila das jazidas, que é transportada para preparação onde será misturada com água e resíduos para garantir as propriedades exigidas ao produto martelos (CETESB; FIESP, 2008). A massa gerada por esta etapa é levada até um desintegrador que fará a redução dos grãos e a homogeneização. Em seguida, ela será moída e misturada mais uma vez, seguindo para o processo de laminação, onde alguns defeitos serão minimizados, eliminando bolhas de ar e aglomerados. A etapa seguinte é a extrusão (ou maromba) que irá dar forma à massa, através de um pistão ou eixo, onde a massa passará por um molde ou bocal com forma da peça desejada. Em seguida, ocorre o corte e o acabamento das peças, onde elas serão cortadas e inspecionadas. Após esta etapa, as peças são encaminhadas ao forno onde ocorrerá o processo de queima a temperaturas entre 700-900°C, a fim de garantir resistência mecânica, cor, entre outras.

A fabricação de cerâmica branca, similar a vermelha, inicia-se pela extração da argila. A próxima etapa consiste na trituração dessa massa reduzindo o tamanho de partícula para aproximadamente 2mm, através de moinhos de bolas, rolos ou martelos (CETESB; FIESP, 2008). Em seguida, as peças de cerâmica são moldadas para obter a forma do produto desejado, por meio de quatro processos principais (colagem, prensagem, extrusão,

torneamento). Após esta etapa, as peças moldadas ainda contêm alto teor de umidade, sendo necessário um processo de secagem, o que é feito em fornos cujas temperaturas podem chegar até 170°C. Os produtos recebem uma camada fina de esmalte ou vidrado para garantir algumas propriedades aos produtos como melhora estética, resistência mecânica e elétrica. Em seguida, as peças são encaminhadas para fornos onde ocorre a etapa da queima, em temperaturas que podem chegar a 1.700°C, na qual obterão algumas propriedades como cor, brilho, porosidade, estabilidade dimensional, entre outros. Por fim, o produto cerâmico passa por uma inspeção e classificação, visando analisar os aspectos superficiais e características mecânicas de cada produto.

Consumo energético e emissões

O consumo energético do setor de cerâmica é caracterizado pela elevada parcela de biomassa na sua matriz (EPE, 2023). Entretanto, ao longo dos anos houve uma redução da parcela de lenha utilizada pelo setor, saindo de mais de 70% em 1970 para próximo a 50% em 2022 (Figura 77). O óleo combustível, segunda principal fonte energética na década de 1970 e 1980, teve sua participação reduzida para níveis próximos de zero. Em contrapartida, o gás natural, que era inexistente, passou a ser inserido nesta indústria a partir dos anos 1980 chegando a 33% do consumo de energia do setor em 2022. Além do gás natural, outras fontes de petróleo (como GLP) passaram a ser consumidas pelo setor ao longo dos últimos 50 anos.

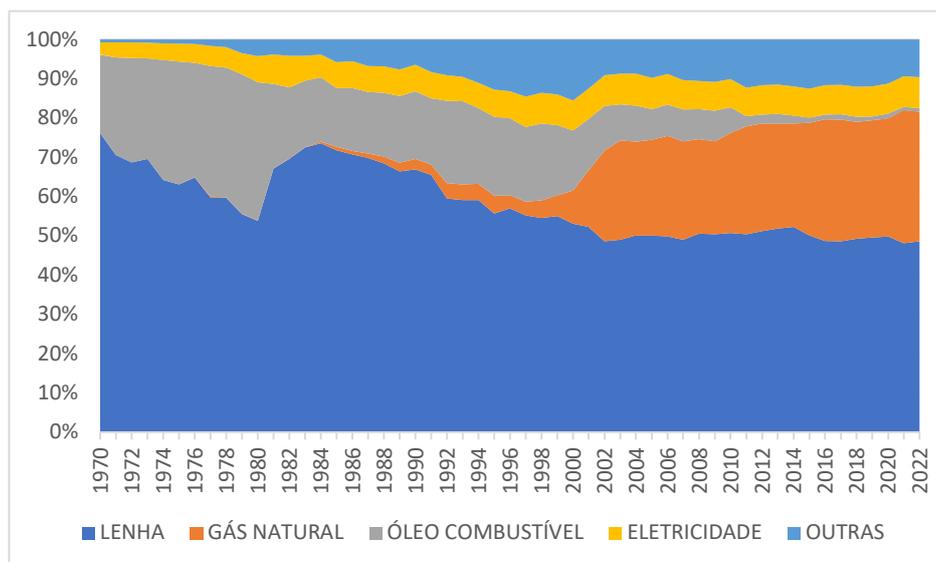


Figura 77 - Matriz energética do setor de cerâmica entre 1970 e 2022

Fonte: elaboração própria com base em (EPE, 2023a)

A energia consumida pela indústria de cerâmica é majoritariamente nos fornos, onde é utilizado tanto o gás natural e a lenha. Outro importante uso da energia é para o processo de secagem da cerâmica, que pode ser feita utilizando ventiladores que podem reaproveitar os gases quentes que saem do forno (EPE, 2018f).

O setor de cerâmica por apenas 4,6% do consumo energético da indústria brasileira, com um total de quase 4 mil ktep em 2022 (EPE, 2023). Na análise entre 2005 e 2022, houve um aumento do consumo energético na ordem de 17%. Entretanto, o setor apresentou, em 2013, o maior valor da demanda de energia, de 5.000 ktep, cerca de 50% maior do que o valor registrado em 2005 (Figura 78).

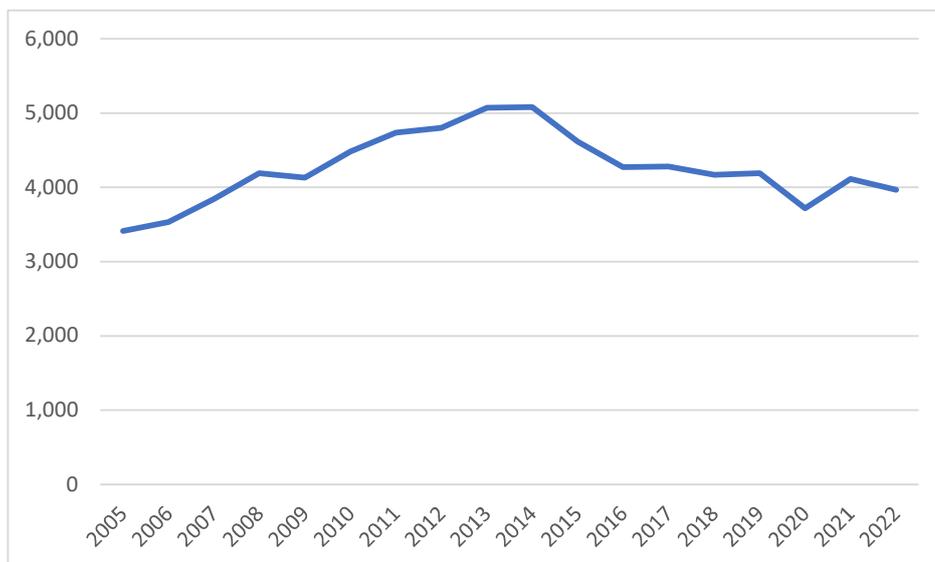


Figura 78 - Consumo energético do setor de cerâmica entre 2005 e 2022

Fonte: elaboração própria com base em (EPE, 2023a)

Em um comportamento análogo, as emissões do setor de cerâmica também apresentaram um crescimento no período até 2013, e acompanhando a tendência da demanda de energia, a partir desse ano as emissões decrescem. No período histórico apresentado, houve um crescimento de 16%, similar ao valor registrado para o aumento do consumo de energia (Figura 79).

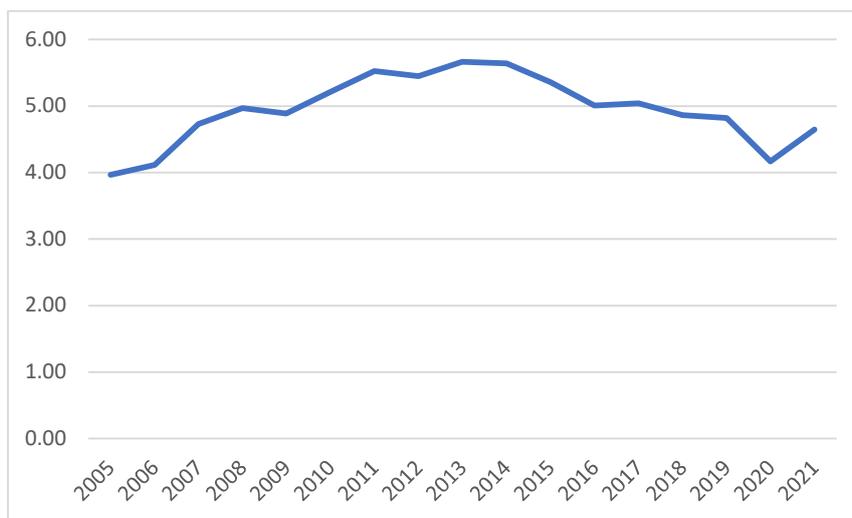


Figura 79 - Emissões de GEE do setor de cerâmica entre 2005 e 2021

Fonte: elaboração própria com base em (SEEG, 2023)

A11. Outras indústrias

O setor industrial é constituído por uma vasta quantidade de processos e produtos. A EPE desagrega o consumo energético industrial para os principais segmentos em termos de relevância na produção industrial e no consumo de energia. As demais atividades industriais são aglomeradas dentro de um segmento intitulado “Outras Indústrias”, que é constituído por segmentos como vidro, cal, gesso, além de outros não intensivos em energia.

Perfil energético e de emissões

De acordo com o Balanço Energético Nacional (EPE, 2023), o consumo energético do setor de Outras Indústrias é marcado pela substituição do óleo combustível por outras fontes de energia, em especial o gás natural (Figura 80). Nos anos 70, óleo combustível era a principal fonte de energia, responsável por quase 40% do consumo energético do setor. A partir de 1985 há uma inserção do gás natural, em detrimento do óleo combustível. Hoje, a fonte líquida é praticamente nula, com cerca de 0,5% da demanda de energia do setor, enquanto gás natural responde por quase 20%. Outro ponto de destaque que pode ser visto na série histórica é o crescimento do uso de eletricidade, saindo de 19% em 1970 e se tornando a fonte de energia principal deste segmento, totalizando quase 60% do consumo energético.

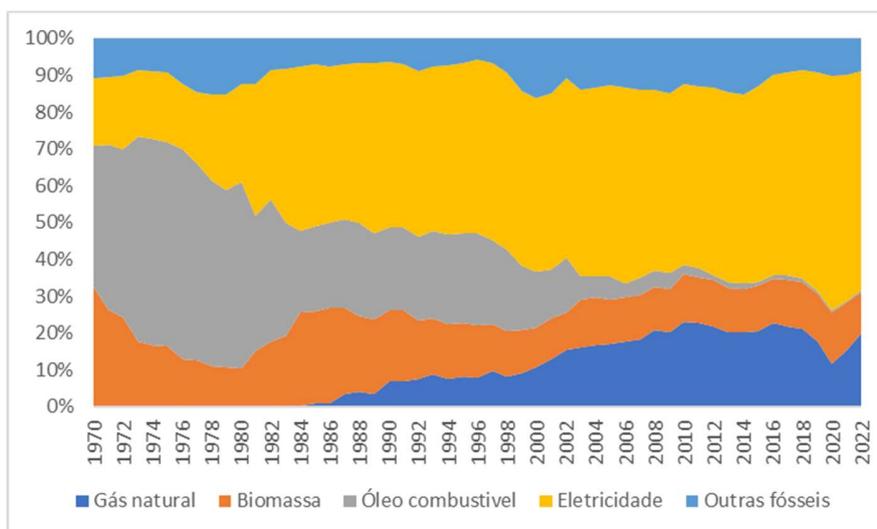


Figura 80 - Matriz energética do setor de "Outras indústrias"

Fonte: elaboração própria com base em EPE (2023a)

O consumo de energia do setor de 'Outras indústrias' era de 5.826 ktep, e nos nove anos seguintes houve um aumento significativo nesse consumo, chegando a 7.622 ktep, cerca de 30% maior do que no primeiro ano apresentado (Figura 81). A partir de 2014, houve uma queda no consumo energético até 2021, quando os níveis se tornaram próximos aos de 2005. Entretanto, em 2022 houve um aumento do consumo energético superando os maiores valores registrados na série histórica apresentada.

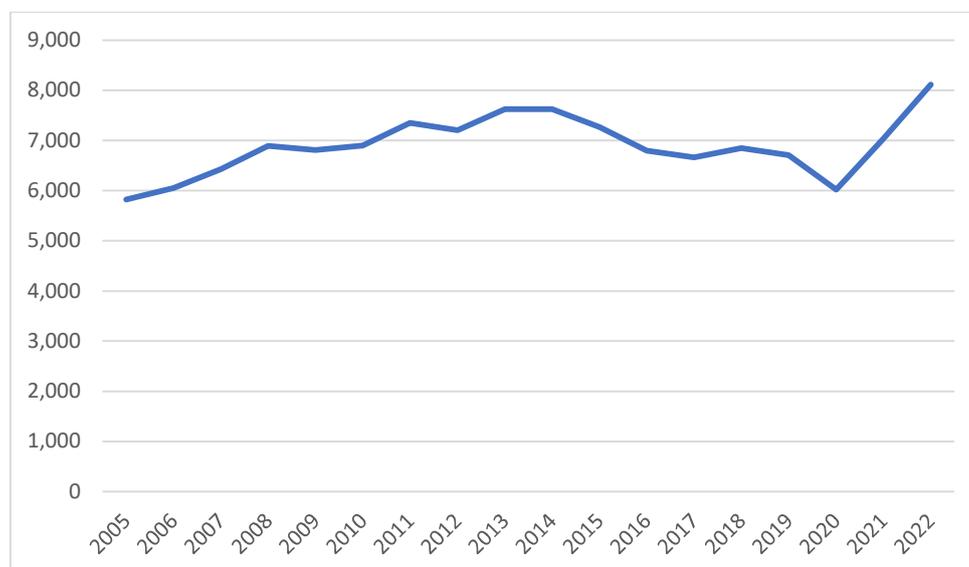


Figura 81 - Consumo energético do setor de "Outras indústrias" entre 2005 e 2022

Fonte: Fonte: elaboração própria com base em EPE (2023b).

Em relação às emissões do setor, houve um crescimento da quantidade de gases de efeito estufa emitida entre 2005 e 2008 na ordem de 27%. Nos seis anos seguintes, as emissões permaneceram próximas ao patamar de 8 MtCO₂e, caindo acentuadamente a partir de 2014, chegando ao menor nível da série em 2020, com um valor 14% inferior ao do primeiro ano registrado. Este comportamento pode ser explicado, principalmente, pela entrada de fontes renováveis no setor de outras indústrias em detrimento das fontes fósseis, como o óleo combustível.